ESTRUCTURAS LAMINARES
GEOMETRÍA Y FORMA DE LA ARQUITECTURA DE *CÁSCARA*

Autor: Tomás Solana Lacasa
Tutor: Pedro Molina-Siles

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Curso 2019 - 2020





ÍNDICE

1. Resumen 1

2. Introducción 5

3. Objetivos y metodología 7

4. Contexto 9

5. Eduardo Torroja 15

I. Mercado de Algeciras 17

II. Frontón de Recoletos 23

6. Félix Candela 29

III. Pabellón de los Rayos Cósmicos 31

IV. Paraguas Experimental 37

V. Capilla de Nuestra Señora de la Soledad 43

VI. Restaurante Los Manantiales 49

VII. Capilla de Palmira 55

VIII. Planta Embotelladora Bacardí 61

IX. Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe 67

7. Eladio Dieste 73

X. Terminal Municipal de Ómnibus 75

5. Propuesta 81

6. Conclusiones 93

7. Bibliografía / Recursos en Red 95

8. Referencia de imágenes 99

RESUMEN

La arquitectura *laminar* o arquitectura de *cáscara* es un tipo de construcción realizada generalmente en hormigón armado, cuya mayor aportación es la estructura laminar o de cáscara, con la lámina como elemento protagonista, caracterizada por su poco espesor en comparación con sus otras dimensiones. Gracias a las capacidades estructurales de las geometrías que se adoptan en este tipo de arquitectura, a la manera de trabajar del material y a las oportunidades que ofrecen los sistemas de encofrado, se consigue alcanzar formas complejas de grandes luces.

El objetivo es estudiar, interpretar y entender cómo se construyen geométricamente algunas de las obras más representativas de este tipo de arquitectura, sirviéndonos de herramientas informáticas de modelado en 3D como Rhinoceros y Grasshopper. Como resultado del trabajo se lleva a cabo la realización y representación gráfica de un pabellón generado por medio de estas herramientas, proponiéndolo como ejemplo de arquitectura de *cáscara*.

Palabras clave: arquitectura de *cáscara*, arquitectura *laminar*, estructura laminar, lámina, Rhinoceros, Grasshopper, representación gráfica.

RESUM

L'arquitectura *laminar* és un tipus de construcció realitzada generalment en formigó armat, la major aportació de la qual és l'estructura laminar, amb la làmina com a element protagonista, caracteritzada per el seu poc espessor en comparació amb les seues altres dimensions. Gràcies a les capacitats estructurals de les geometries que s'adopten en aquest tipus d'arquitectura, a la manera de treballar del material i a les oportunitats que ofereixen els sistemes d'encofrat, s'aconsegueix obtindre formes complexes de grans llums.

L'objectiu és estudiar, interpretar i entendre com es construeixen geomètricament algunes de les obres més representatives d'aquest tipus d'arquitectura, servint-nos d'eines informàtiques de modelatge en 3D com Rhinoceros i Grasshopper. Com a resultat del treball es duu a terme la realització i representació gràfica d'un pavelló generat per mitjà d'aquestes eines, proposant-lo com a exemple d'arquitectura *laminar*.

Paraules clau: arquitectura *laminar*, estructura laminar, làmina, Rhinoceros, Grasshopper, representació gràfica.

ABSTRACT

Shell architecture is a type of construction generally built on reinforced concrete, whose biggest contribution is the shell structure, with the shell as principal element, defined by its small thickness in comparison with its remaining dimensions. Thanks to the geometry adopted, the way the material works and the opportunities that the formwork system gives, it is possible to achieve complex forms and big spans.

The target is to study, interpret and understand how some of the representative constructions of this kind of architecture are geometrically built; using 3D modelling computing tools such as Rhinoceros and Grasshopper. As a result of the study it is designed and graphically represented a pavilion produced by these computing tools, proposed as an example of *shell* architecture.

Key words: *shell* architecture, shell structure, shell, Rhinoceros, Grasshopper, graphic representation.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras laminares, o cáscaras, son aquellas que se caracterizan por su poco espesor en comparación con sus otras dimensiones. Suele tratarse de láminas delgadas que adoptan formas curvas, permitiendo obtener construcciones de una alta eficiencia en lo que respecta al comportamiento estructural. Cobra especial protagonismo la geometría del paraboloide hiperbólico, desarrollada por el arquitecto Félix Candela.

Para su construcción se utiliza generalmente el hormigón armado, material que cobra un gran protagonismo en el contexto de las estructuras laminares. Sin embargo, también destacan otros materiales en la construcción de estas estructuras, como es el caso de la cerámica armada.

El comportamiento de los materiales empleados junto con las formas geométricas adoptadas, permiten reducir al máximo el uso del material necesario para su construcción.

La economía, la esbeltez y el óptimo comportamiento estructural son varios de los objetivos que se plantean algunos de los arquitectos e ingenieros que se dedican al desarrollo de la arquitectura de cáscara, y están presentes en las obras que se estudian a continuación.

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo es estudiar, interpretar y entender cómo se construyen geométricamente algunas de las estructuras laminares más representativas. Para ello se expone una breve descripción del contexto en el que se desarrollan las estructuras laminares para pasar, posteriormente, al análisis geométrico y formal de diez de las obras más representativas de tres autores destacados en el contexto internacional de las estructuras laminares. Estos autores son: Eduardo Torroja, Félix Candela y Eladio Dieste.

Del ingeniero Eduardo Torroja se han escogido dos de sus obras más importantes y reconocidas en las que se refleja la variedad de formas con las que afrontaba cada proyecto.

En la selección de siete obras del arquitecto Félix Candela se muestra cómo, a partir de un único elemento geométrico (el paraboloide hiperbólico), consigue ofrecer un sinfín de estructuras laminares de una gran variedad.

La obra seleccionada del ingeniero Eladio Dieste realizada en “cerámica armada” muestra la posibilidad de realizar estructuras laminares a partir de un elemento tradicional y económico como es la cerámica. Además es un ejemplo del uso de la bóveda de directriz catenaria, empleada con frecuencia por Dieste.

Para la realización del análisis geométrico y formal de las obras

se han empleado las herramientas informáticas de modelado en 3D Rhinoceros y Grasshopper.

Como resultado del trabajo se lleva a cabo la realización y representación gráfica de un pabellón generado por medio de estas herramientas, proponiéndolo como ejemplo de arquitectura de cáscara.

CONTEXTO

A lo largo de la historia de la arquitectura, la construcción siempre ha ido acompañada de la búsqueda de la forma resistente. Un ejemplo lo encontramos en la construcción de las bóvedas de medio punto construidas en ladrillo y utilizadas frecuentemente en la arquitectura romana. Otro ejemplo lo encontramos en las cúpulas que históricamente se han construido para cubrir grandes espacios y que, al igual que las bóvedas, buscaban aprovechar la resistencia a compresión de los materiales empleados.

Sin embargo, es en el siglo XX, con el desarrollo del hormigón armado, cuando empiezan a aparecer las primeras estructuras laminares. Gracias a los avances técnicos del material se consiguen proyectar formas esbeltas de reducido espesor. En el contexto internacional de los años treinta destaca la figura del ingeniero español Eduardo Torroja Miret, que estuvo a la vanguardia del desarrollo del hormigón armado y pretensado. Torroja aportó un método científico para el análisis estructural de las construcciones laminares basado en la realización de modelos físicos reducidos, por el cual, fue reconocido internacionalmente, ya que en aquellos momentos se desconocían métodos fiables para el análisis y cálculo de este tipo de estructuras.

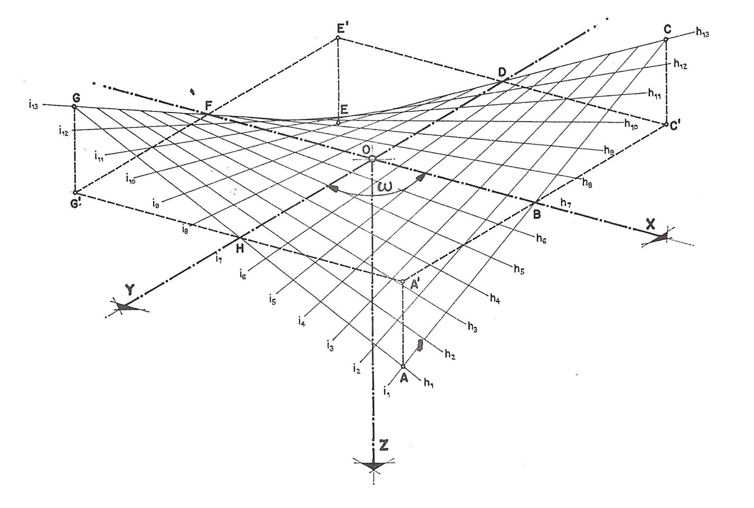
El propio Torroja utilizó modelos físicos en microhormigón a escala 1:10 para la comprobación del comportamiento estructural de dos de sus láminas más conocidas, el Frontón de Recoletos y el

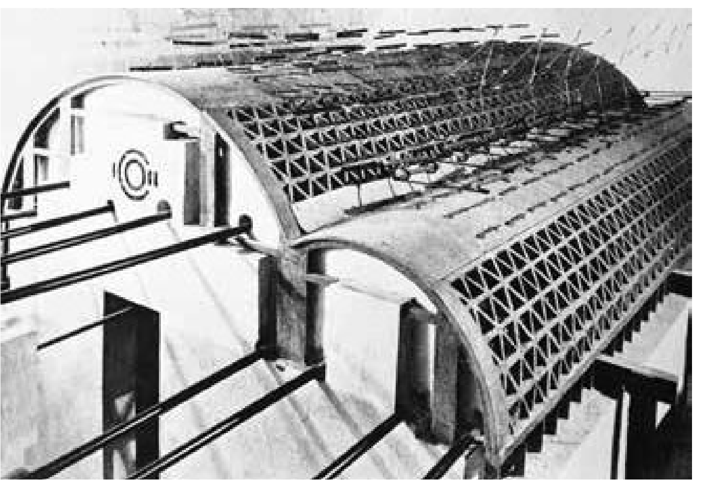
Mercado de Algeciras.

Es en la década de los años treinta, cuando Torroja construye algunas de sus obras más reconocidas, en las que se admira la eficiencia y la variedad de las formas que realiza. Tal y como indica Pepa Cassinello (2010, p.69) “La característica común a todas las obras de Eduardo Torroja fue sin duda su variada y genial innovación, no repitiendo nunca las mimas formas ni sistemas constructivos.”

Otra figura de gran relevancia en el contexto de las estructuras laminares es el arquitecto español Félix Candela Outeriño. Desde sus orígenes como estudiante en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Candela estuvo interesado por las posibilidades que aportaba el hormigón armado al desarrollo de las estructuras laminares. Además, pudo conocer con detalle el proceso constructivo seguido por Torroja en las construcciones que realizó en Madrid.

Tras exiliarse a México después de la Guerra Civil, funda, junto con varios asociados, la empresa Cubiertas Ala dedicada únicamente a la construcción de estructuras laminares. Es en este país donde se desarrolla la mayor parte de su carrera profesional, permitiéndole especializarse en este tipo de arquitectura.





Página izquierda:
Fig. 1. Representación del paraboloide hiperbólico
Fig. 2. Modelo a escala 1:10 del Frontón de Recoletos

* Abreviatura en inglés de “paraboloide hiperbólico”.

Candela fue autodidacta en lo que respecta a su especialización en las estructuras laminares y buscaba la forma más rápida de adquirir los conocimientos necesarios para la construcción de cáscaras, por lo que, con conocimiento de la Estática, la Mecánica y la Resistencia de Materiales, siguió el método empírico a través de la realización de modelos físicos. En muchas de sus obras realizó modelos a escala natural para comprobar el comportamiento estructural de sus cáscaras.

Candela elige la geometría del paraboloide hiperbólico (hypar*) como base para dar forma a un sinfín de láminas. Esta elección se debe a sus excelentes cualidades estructurales y constructivas, ya que se trata de una superficie reglada de doble curvatura formada por dos sistemas de generatrices rectas, es decir, la superficie se genera a partir del movimiento de dos grupos de rectas, por lo que, en lo que respecta al encofrado, este se puede conformar a partir de piezas rectas, facilitando en gran medida el montaje del mismo.

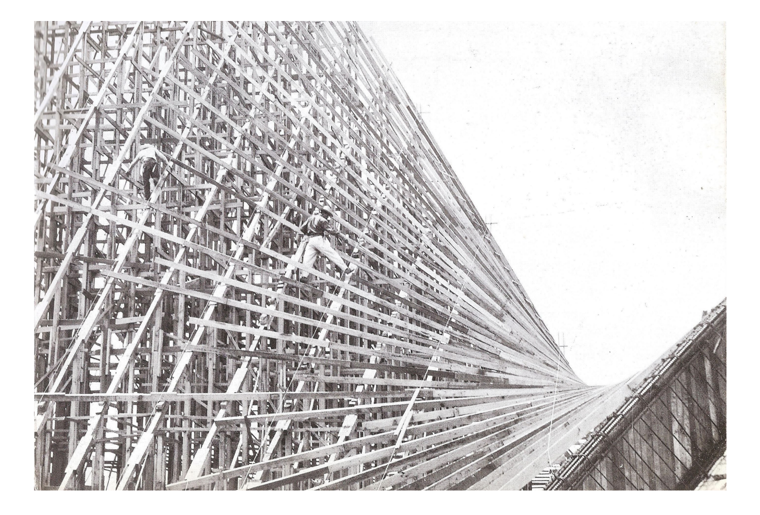
Candela supo aprovechar al máximo las capacidades del material y, a través de la geometría, producir formas eficientes y de alta calidad estética. Tal y como apunta Pepa Cassinello (2010, p. 62), para Félix Candela es en las cáscaras “donde el hormigón armado encontró la más racional manifestación de su razón de ser”.

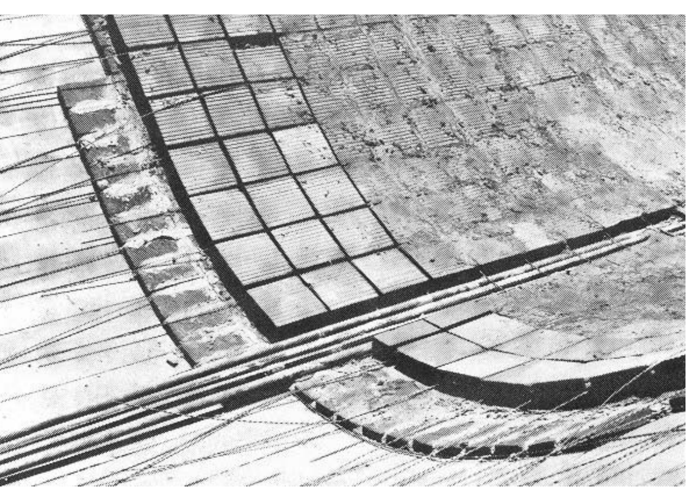
Sin embargo, el hormigón armado no es el único material con el que poder realizar cáscaras eficientes en lo que respecta al material y a la capacidad estructural. En el mismo siglo, el ingeniero uruguayo Eladio Dieste descubre la "cerámica armada" para mostrar al mundo las capacidades de este material en la construcción de láminas delgadas capaces de transmitir esfuerzos de forma tangencial a su superficie.

La economía es un punto muy importante en la obra de Dieste. El ladrillo que Dieste utiliza se produce de forma artesanal en todo el territorio de Uruguay y es fácilmente accesible debido a su bajo coste. Según Gonzalo Larrambebere (2010, p. 223), Eladio Dieste encuentra en el ladrillo "un material resistente, durable, económico, aislante, manuable, apto para reproducir superficies espaciales y trasmisor de la elegancia y calidez de siglos de tradición constructiva."

Dieste combina la cerámica con el acero para dar forma a sus estructuras laminares. Incorpora el acero de forma regular para conseguir un material homogéneo, esto lo consigue al disponer las piezas cerámicas formando una retícula sin ningún tipo de aparejo permitiendo el paso del acero entre las piezas en ambas direcciones sin verse este interrumpido.

Uno de los elementos con los que trabaja Dieste son las

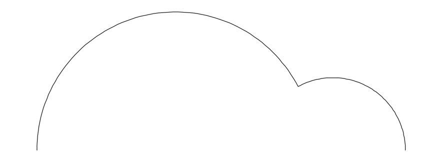


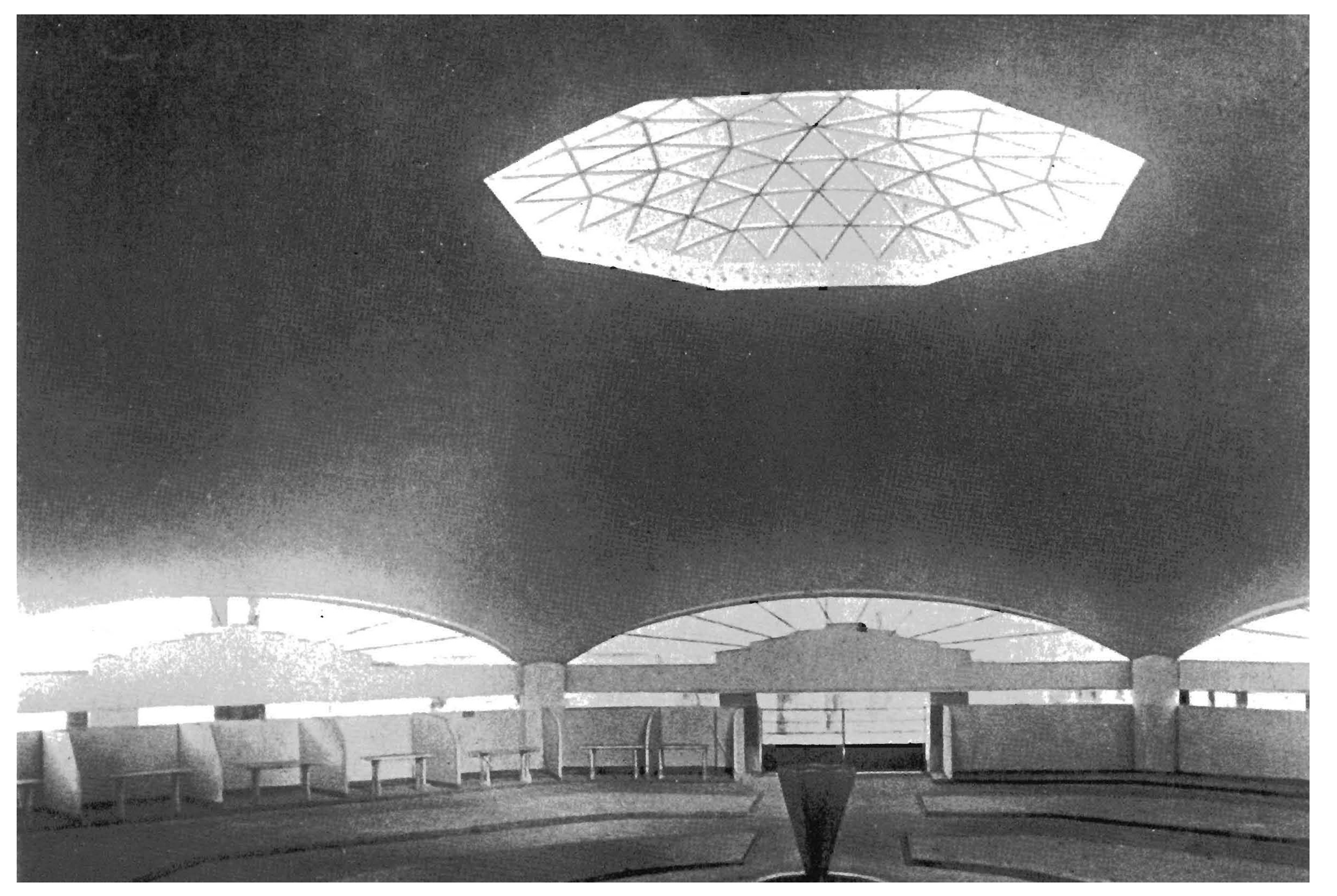


Página izquierda:
Fig. 3. Preparación de cimbras de la Capilla de Palmira
Fig. 4. "Construcción de la cubierta ondulada de la Iglesia de la Atlántida con las piezas en retícula y el armado homogéneo, dejando un espacio para incorporar el armado del tirante".

bóvedas de directriz catenaria. Elige esta forma para sus bóvedas debido a la capacidad de esta geometría de transmitir las cargas por medio de compresiones y evita que aparezcan en la superficie de la bóveda esfuerzos de flexión o tracción. De este modo permite sacarle el máximo partido a la capacidad portante del ladrillo cerámico.

EDUARDO TORROJA





MERCADO DE ALGECIRAS
(1934)

Este edificio fue construido en Algeciras, España, y fue proyectado por el ingeniero Eduardo Torroja, con la construcción a cargo de el arquitecto Manuel Sánchez Arcas.

En este proyecto se requería cubrir un gran espacio para dar cobijo al mercado. La economía era un factor relevante, por lo que en lugar de utilizar un sistema tradicional de pórticos de hormigón armado se opta por la construcción de una gran cúpula de 47'6 metros de diámetro que reduce la cantidad de hormigón necesario al máximo y permite obtener un gran espacio diáfano. La cúpula descansa sobre 8 soportes, generando un espacio de planta octogonal de 18'2 metros de lado.

Entre los soportes se produce la intersección de la cúpula con 8 fragmentos de bóveda cilíndrica de eje horizontal, estos reducen el riesgo de que los bordes libres de la cúpula flecten, dan rigidez a la cubierta, ayudan a conducir los esfuerzos hacia los soportes y funcionan como marquesinas para proteger los accesos al interior.

Además, los soportes se encuentran atirantados por un anillo octogonal posteado que, según el propio Eduardo Torroja (2010, p.119) "recoge y equilibra los empujes radiales de la cúpula sobre los soportes".

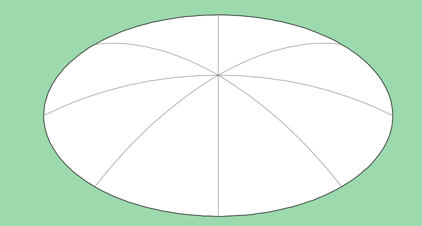
En lo que respecta al espesor de la cubierta, en la parte más alta este es de 10 centímetros, sin embargo, para hacer frente a los esfuerzos que van en aumento hasta el encuentro con los apoyos, la cúpula aumenta su espesor gradualmente hasta alcanzar los 50 centímetros en su parte inferior.

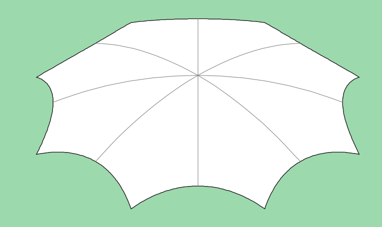
Para favorecer la iluminación natural dentro del espacio interior la cúpula se remata en la parte superior con un lucernario de forma octogonal situado en la clave. Su dimensión es de 9,1 metros de diámetro de la circunferencia en la que se inscribe.

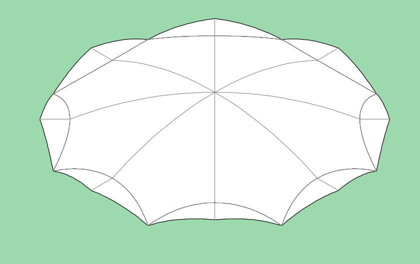
Página izquierda: Fig. 5. Interior del Mercado de Algeciras

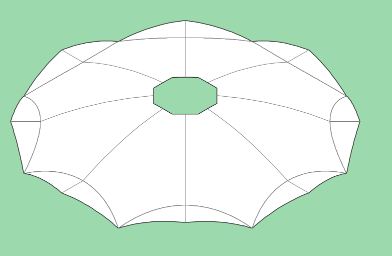
CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA

AXONOMETRÍAS

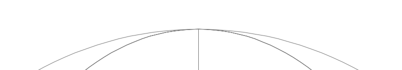


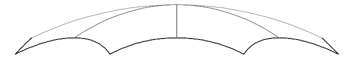


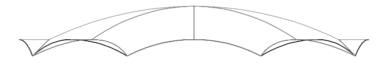


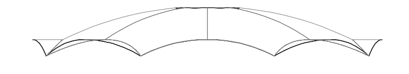


ALZADOS

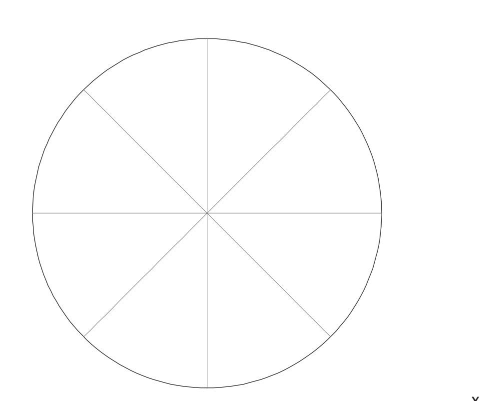




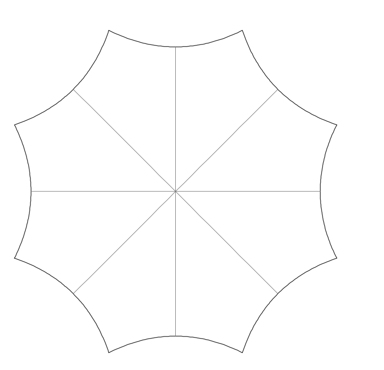




PLANTAS

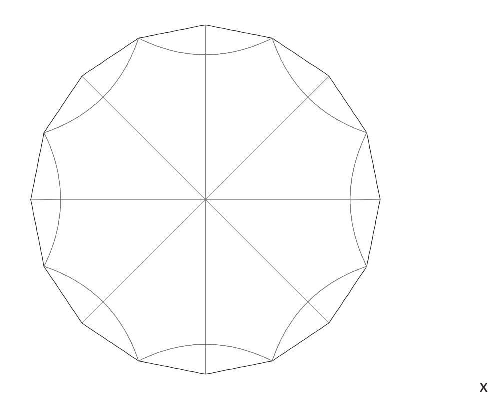


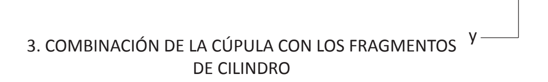
1. CÚPULA A PARTIR DE UNA ESFERA



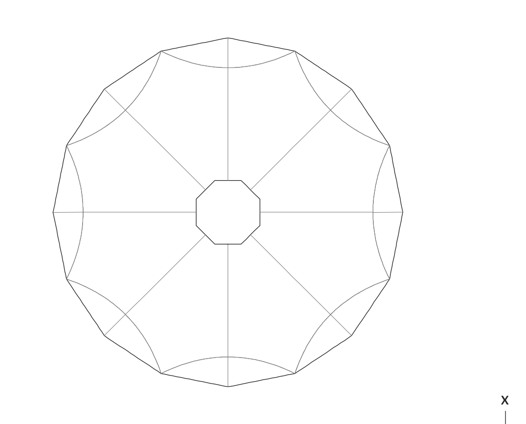


2. CORTE DE LA CÚPULA CON SECCIONES CILÍNDRICAS

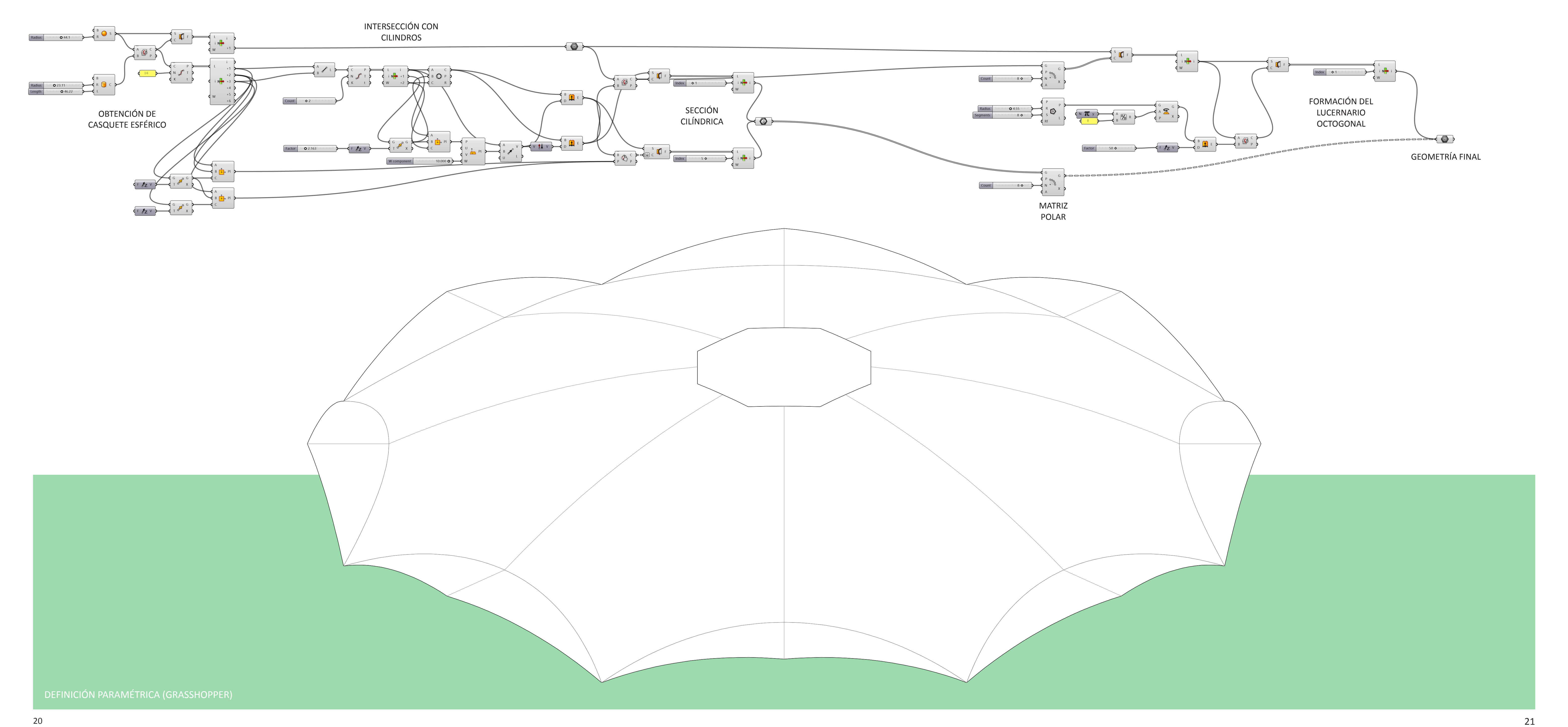




3. COMBINACIÓN DE LA CÚPULA CON LOS FRAGMENTOS DE CILINDRO



4. GEOMETRÍA FINAL CON LUCERNARIO A PARTIR DE INTERSECCIÓN CON OCTÓGONO



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



FRONTÓN DE RECOLETOS
(1936)

Este edificio construido en Madrid, fue proyectado por el ingeniero Eduardo Torroja. El proyecto consistía en realizar un frontón con un espacio de gradas para el público. Lamentablemente, durante la Guerra Civil el edificio sufrió importantes daños y acabo por entrar en estado de ruina, finalmente fue demolido en 1973 a causa de los hundimientos que se habían producido.

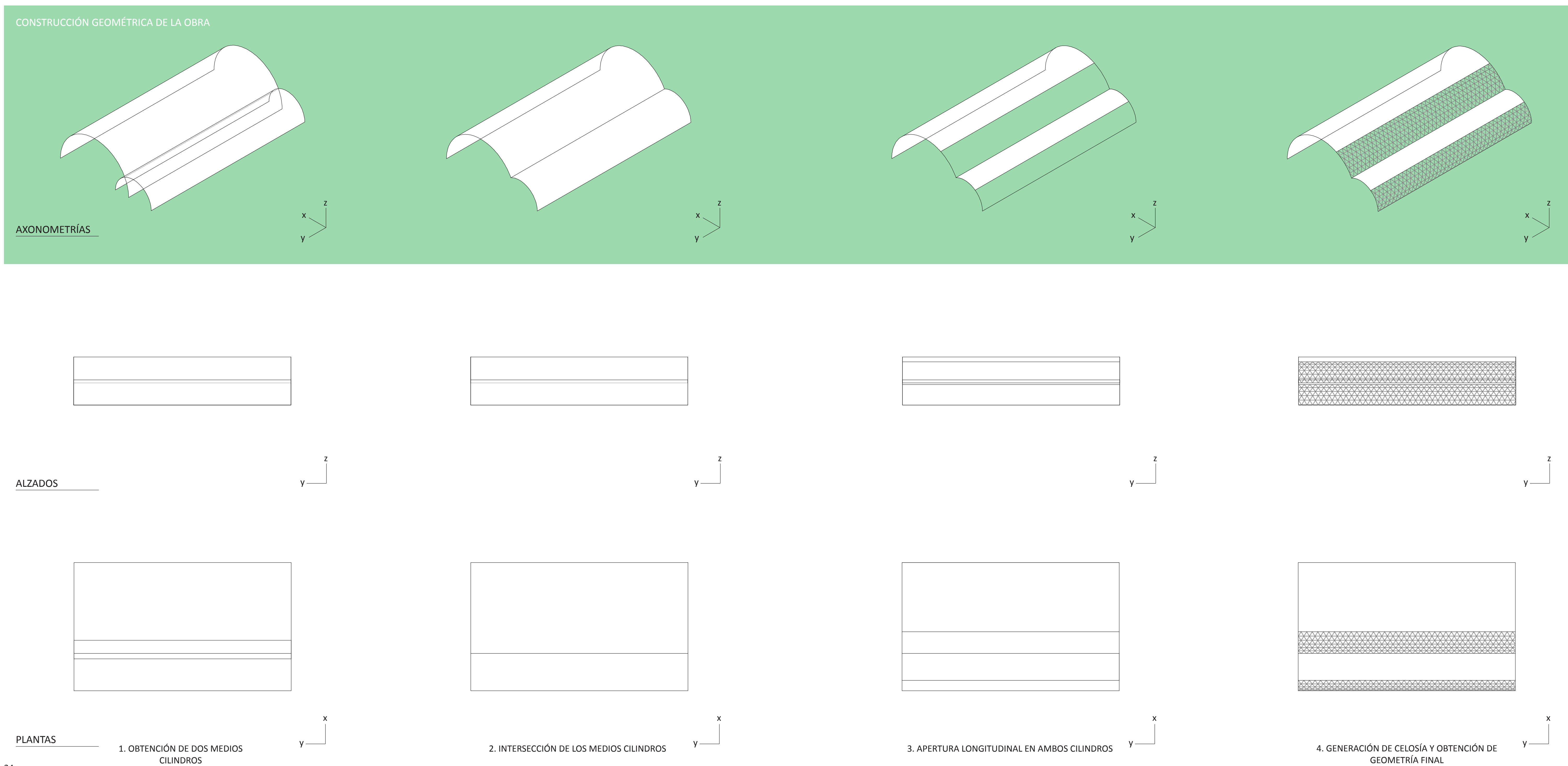
La cubierta proyectada por Eduardo Torroja para el frontón está formada a partir de dos grandes bóvedas cilíndricas de diferentes tamaños que se cortan en un punto formando un ángulo recto. El resultado de la intersección de las bóvedas es una sección "en gaviota", llamada de este modo por Torroja. 1

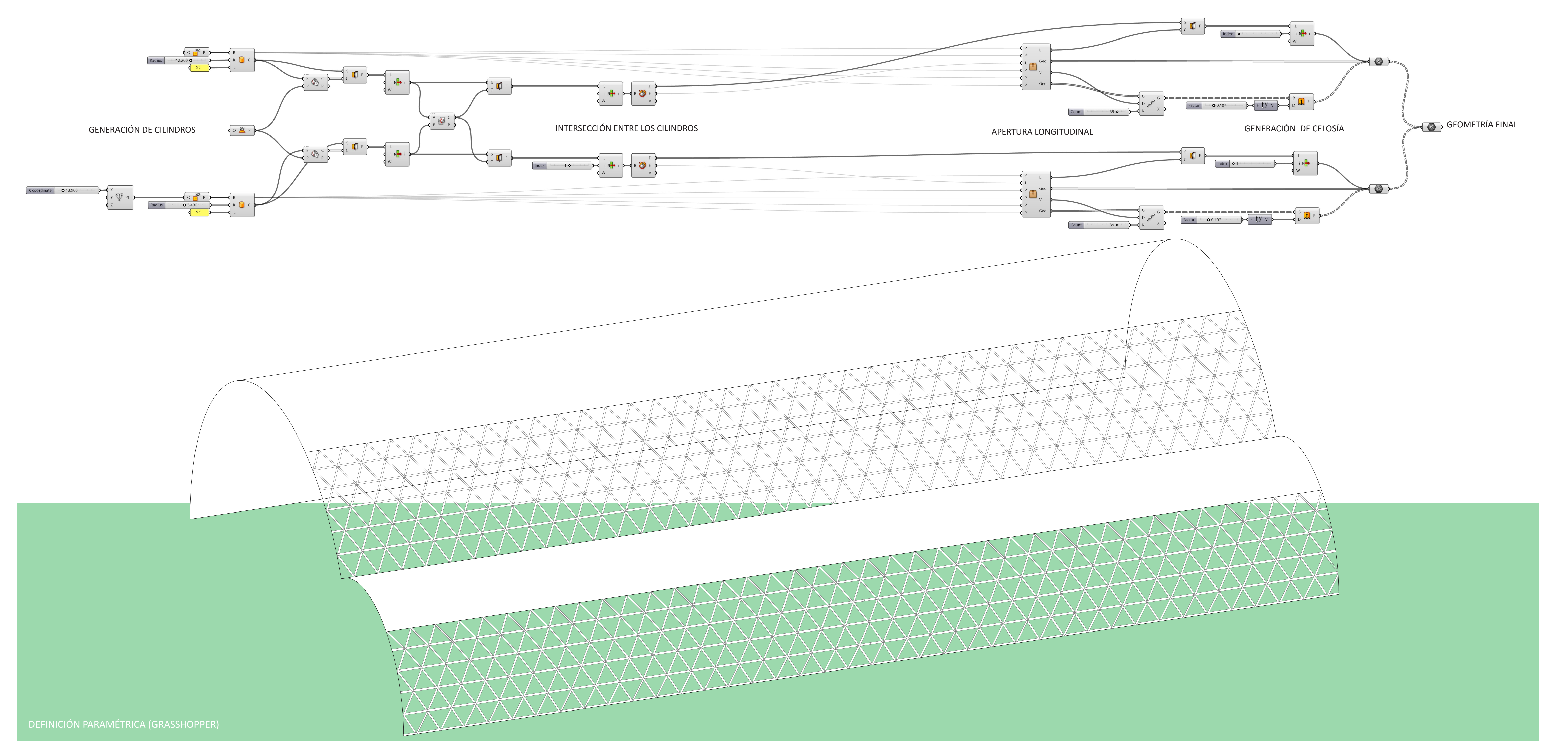
La bóveda de mayor dimensión se ubica sobre la zona de juego, mientras que la de menor dimensión está destinada a cubrir el espacio de las gradas. Las dimensiones del rectángulo que queda cubierto por las bóvedas son de 55 metros de largo por 32,5 metros de ancho.

Por motivos funcionales y de iluminación, Torroja ubica en dos zonas de la cubierta una celosía formada por un gran número de piezas triangulares, generando dos grandes lucernarios longitudinales. Estos lucernarios se orientan a norte para generar una iluminación indirecta. De este modo se consigue una iluminación homogénea que baña todo el espacio.

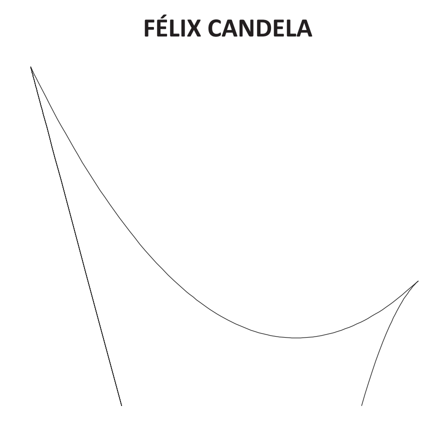
La cubierta aprovecha la rigidez longitudinal de las bóvedas cilíndricas, de esta forma los esfuerzos se transmiten principalmente a los muros transversales sobre las que apoya la bóveda, reduciendo la carga sobre los muros longitudinales. Según el propio Eduardo Torroja (2010, p. 173) el comportamiento estructural, en lugar de ser como el de dos bóvedas que transmite su carga a los muros longitudinales, es como el de "vigas con el alma desdoblada en dos superficies curvas como las alas de una gaviota" . Gracias a la forma adoptada se consigue un espesor de la cubierta de tan solo 8 centímetros.

Página izquierda: Fig. 6. Interior del Frontón de Recoletos


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
ALZADOS
PLANTAS
x
y
z
1. OBTENCIÓN DE DOS MEDIOS CILINDROS
2. INTERSECCIÓN DE LOS MEDIOS CILINDROS
3. APERTURA LONGITUDINAL EN AMBOS CILINDROS
4. GENERACIÓN DE CELOSÍA Y OBTENCIÓN DE GEOMETRÍA FINAL


GENERACIÓN DE CILINDROS
INTERSECCIÓN ENTRE LOS CILINDROS
APERTURA LONGITUDINAL
GENERACIÓN DE CELOSÍA
GEOMETRÍA FINAL
Radius
12.200
55
X coordinate
13.900
6.400
Index
Count
39
Factor
0.107
DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)

FÉLIX CANDELA





PABELLÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS (1951)

Este proyecto construido en la Ciudad Universitaria de la UNAM, en México, fue realizado por Félix Candela con la colaboración del arquitecto Jorge González Reyna y es la primera estructura laminar de Candela en haber sido diseñada a partir de la geometría del paraboloide hiperbólico.

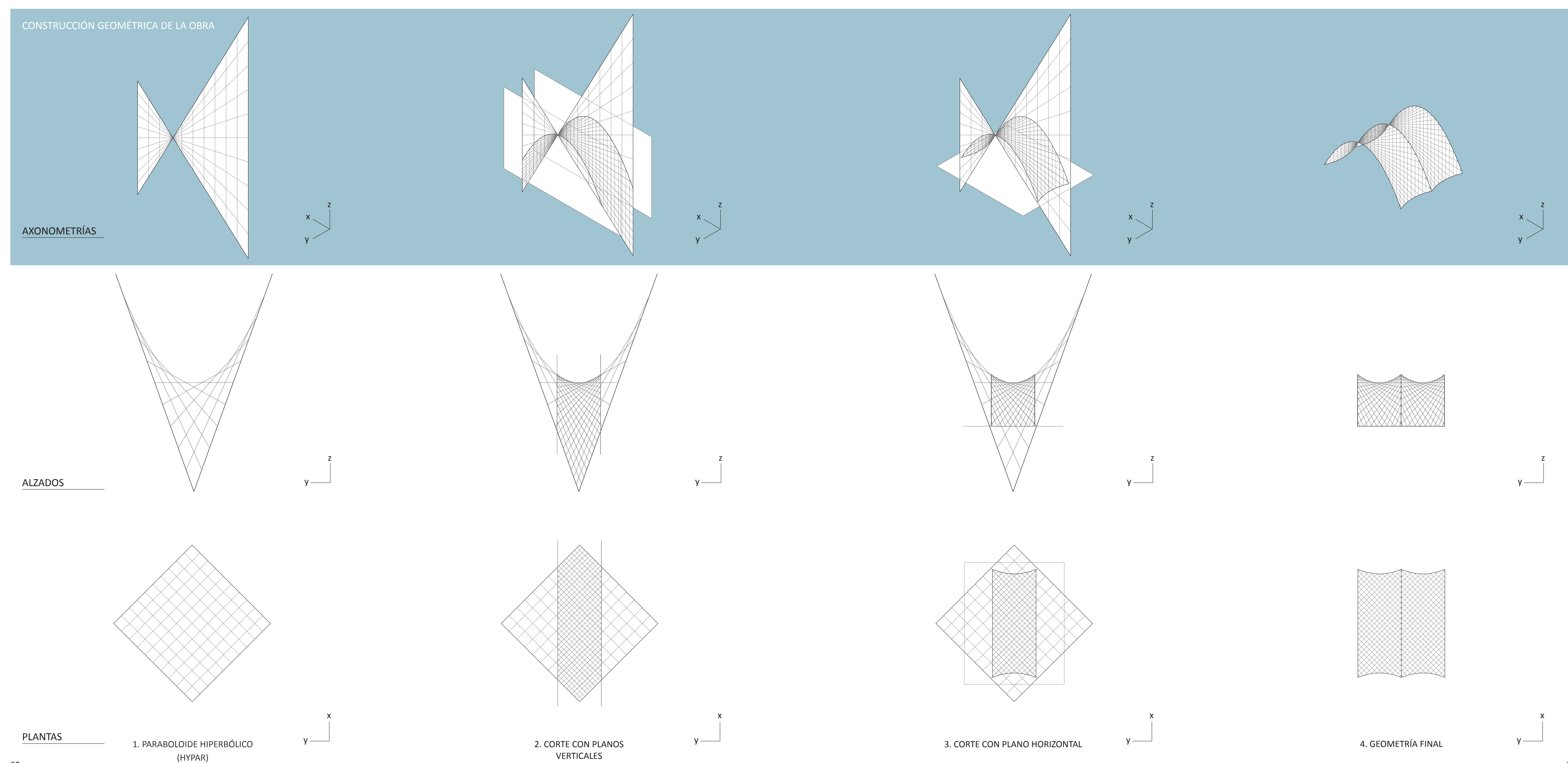
El edificio estaba destinado a funcionar como un laboratorio especializado en la mediciones de rayos cósmicos, por lo que uno de los requisitos del proyecto era el de disponer de muy poco espesor en la cubierta para permitir el funcionamiento de los aparatos de medición del interior, siendo necesario que la envolvente tuviera un grosor menor a 15 centímetros.

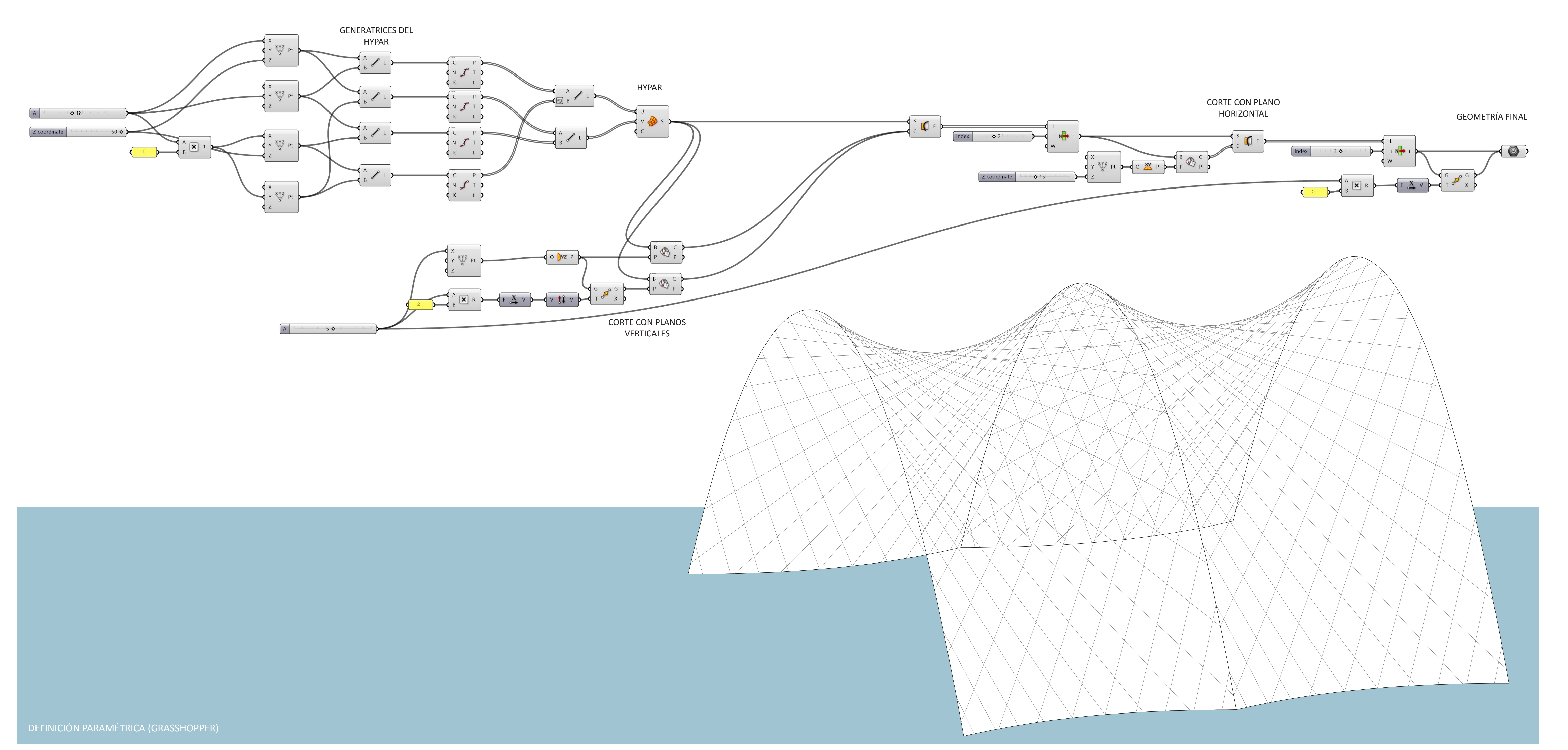
En un principio se plateó la posibilidad de utilizar una bóveda cilíndrica, pero al contar con el impedimento del espesor, Candela se decantó por una bóveda de doble curvatura generada a partir del paraboloide hiperbólico, ya que esta geometría otorgaba un mejor comportamiento resistente y una mayor rigidez, alcanzando espesores mucho menores.

La geometría que da lugar a la cubierta definitiva es la del paraboloide hiperbólico, el cual se secciona por dos planos verticales y un plano horizontal, generando una bóveda de doble curvatura. El resultado es una cubierta con dos bóvedas adosadas. Además, el pliegue que se produce en la parte de unión otorga rigidez a la geometría.

El edificio tiene unas dimensiones en planta de 12 x 10'15 metros y tiene un espesor final que varía entre 1'5 y 2 centímetros, cumpliendo en gran medida con la condición impuesta al proyecto.

Página izquierda: Fig. 7. Pabellón de los Rayos Cósmicos


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
x
y
z
ALZADOS
y
z
PLANTAS
y
x
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO
(HYPAR)
2. CORTE CON PLANOS
VERTICALES
3. CORTE CON PLANO HORIZONTAL
4. GEOMETRÍA FINAL



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



PARAGUAS
EXPERIMENTAL
(1953)

Una de las mayores aportaciones de Félix Candela fue el elemento conocido como "paraguas". Esta estructura de bordes rectos se compone de cuatro paraboloides hiperbólicos que se organizan formando un cuadrado en planta. La geometría se apoya sobre un único pilar central que transmite las cargas a la cimentación mediante esfuerzos axiles.

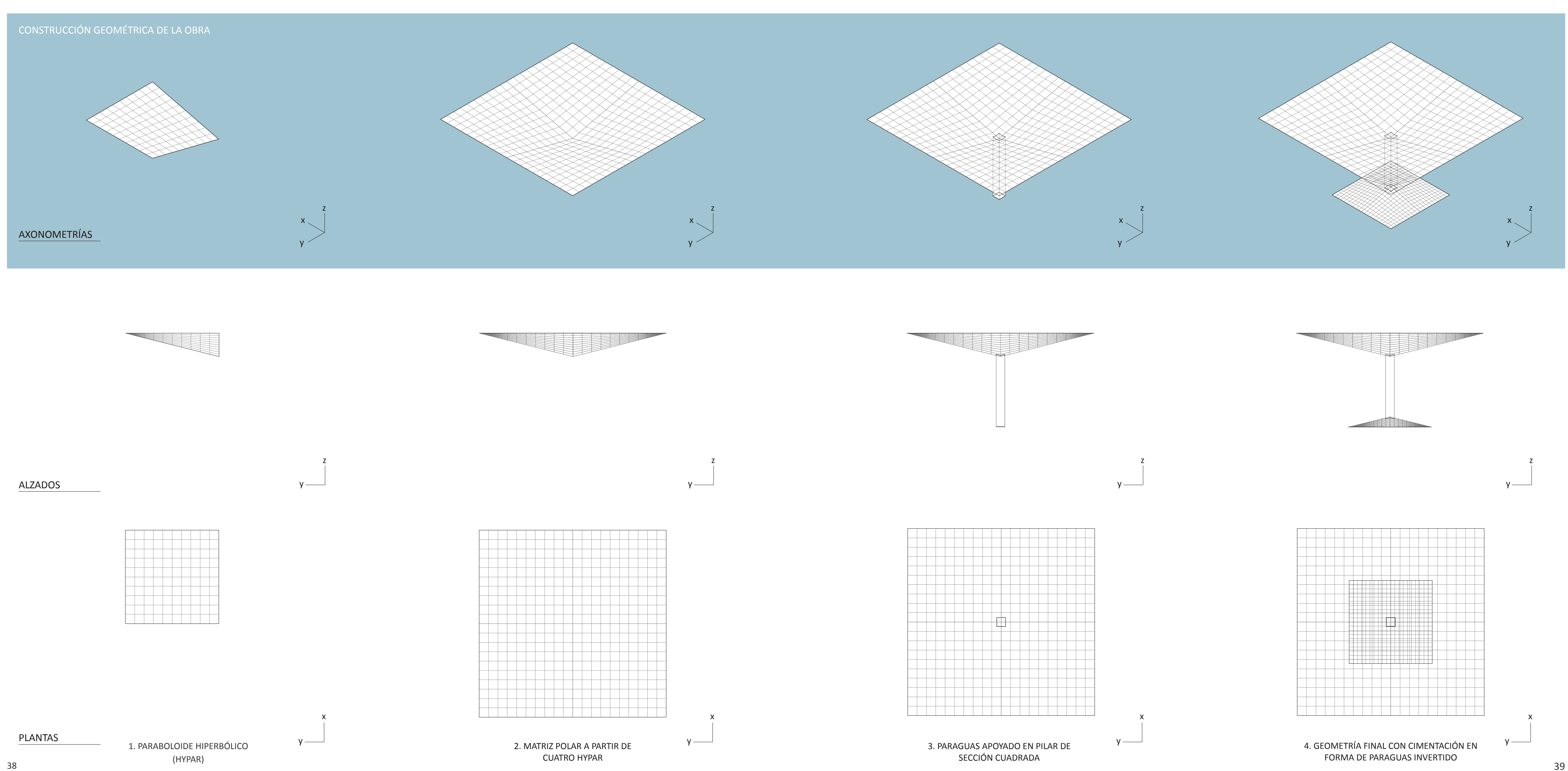
Tras experimentar con esta geometría, Candela descubrió multitud de combinaciones. Podía variar las dimensiones, la inclinación, la forma en planta, etc. Según Javier Manterola (2010, p. 233) "Los hizo de todos los tamaños y disposiciones, de una manera fácil y repetitiva, produciendo cubiertas extraordinariamente hermosas y simples". La forma más sencilla tiene un eje vertical alrededor del cual giran los cuatro fragmentos de paraboloide hiperbólico que componen el paraguas. De esta forma las cargas se distribuyen de forma uniforme hasta el pilar.

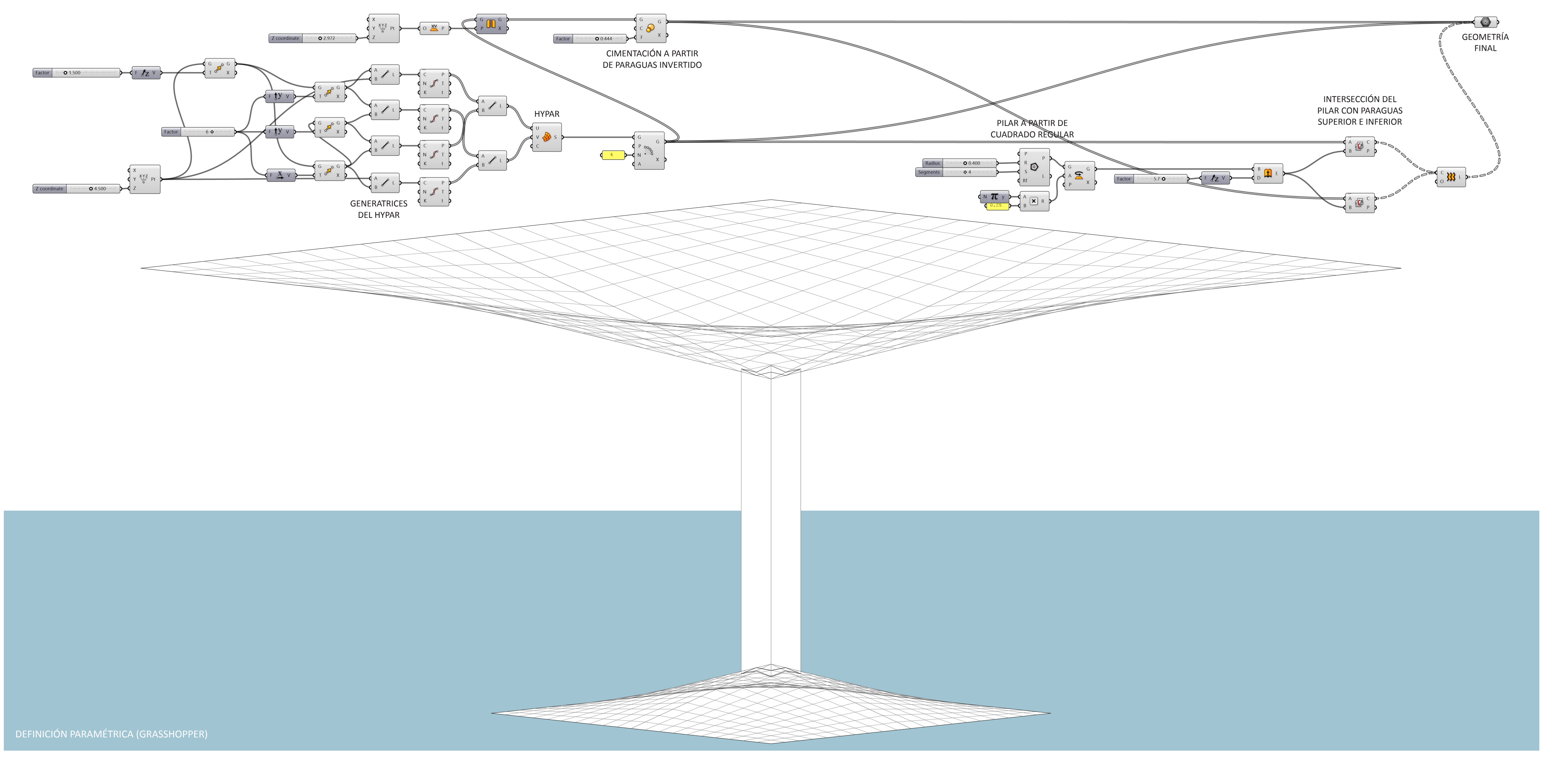
Debido a la sencillez de la forma y la economía de su construcción, este elemento fue muy empleado como medio para cubrir el espacio y competir con los sistemas industriales de la época. El encofrado era sencillo y, al estar formado por módulos, permitía la construcción en serie mediante la repetición de elementos.

Otro uso que se encontró para este tipo de geometría es el de cimentación, en la que el paraguas se veía invertido, siendo esta forma apropiada en los suelos de baja capacidad de carga.

Un ejemplo del paraguas destinado a uso industrial lo encontramos en la Fábrica Celestino Fernández, realizada en México en 1955. En este proyecto se plantea la repetición de paraguas en filas formando una retícula e inclinando ligeramente las cubiertas de una fila respecto de otra para permitir el paso de luz entre las mismas.

Página izquierda: Fig. 8. Hypar tipo paraguas en prueba de resistencia


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
x
y
z
ALZADOS
PLANTAS
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)
2. MATRIZ POLAR A PARTIR DE CUATRO HYPAR
3. PARAGUAS APOYADO EN PILAR DE SECCIÓN CUADRADA
4. GEOMETRÍA FINAL CON CIMENTACIÓN EN FORMA DE PARAGUAS INVERTIDO


CIMENTACIÓN A PARTIR
DE PARAGUAS INVERTIDO
GEOMETRÍA
FINAL
HYPAR
INTERSECCIÓN DEL
PILAR CON PARAGUAS
SUPERIOR E INFERIOR
PILAR A PARTIR DE
CUADRADO REGULAR
GENERATRICES
DEL HYPAR
Z coordinate
2.972
Factor
0.444
1.500
6
4.500
Radius
0.400
Segments
4
5.7
DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



CAPILLA DE NUESTRA
SEÑORA DE LA SOLEDAD
(1955)

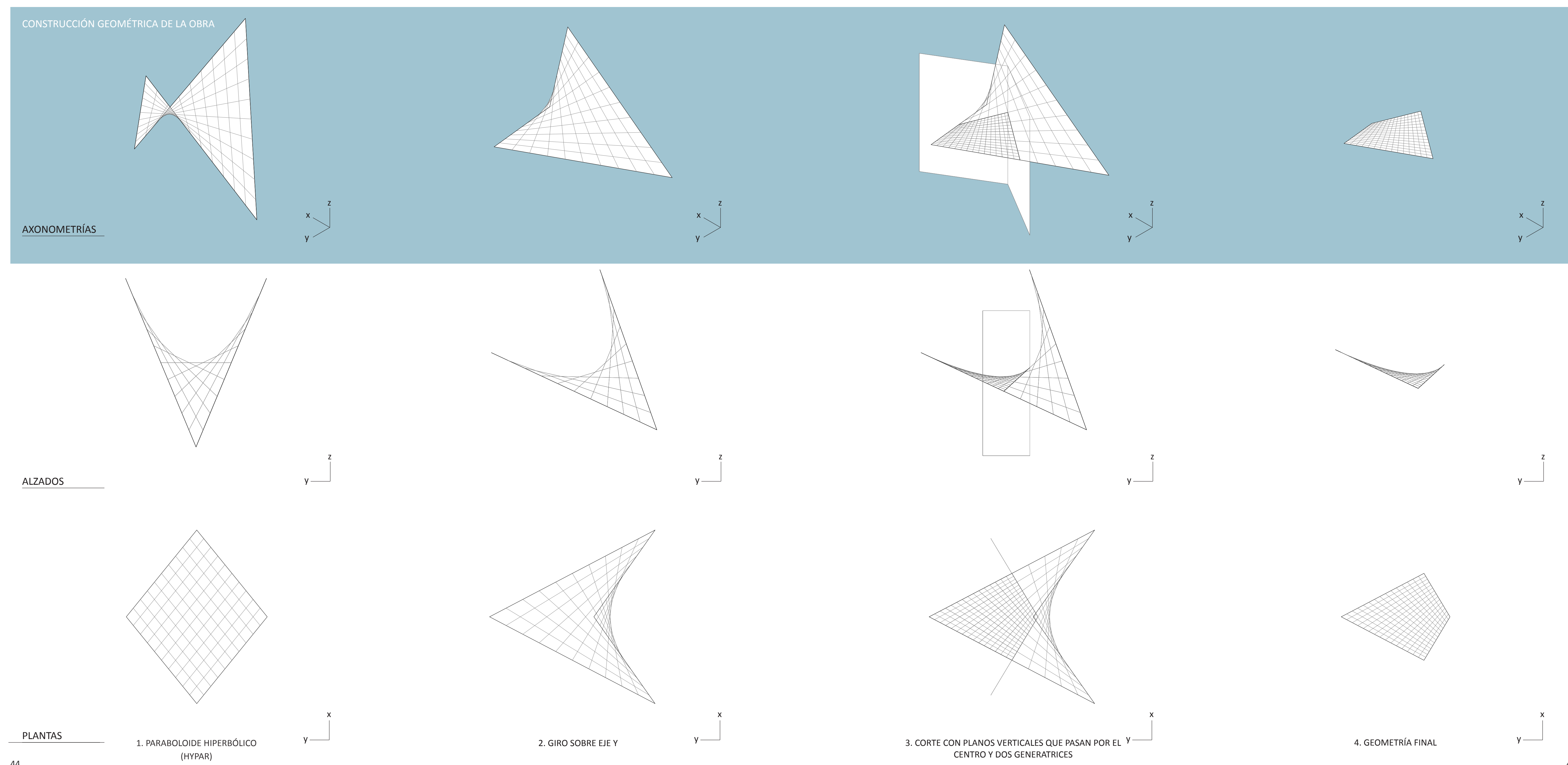
El proyecto de esta capilla situada en Coyoacán, México, fue realizado por Félix Candela junto con los arquitectos Enrique de la Mora y Fernando López Carmona. Juntos realizaron el diseño y construcción de esta capilla conocida también como la Capilla del Altillo.

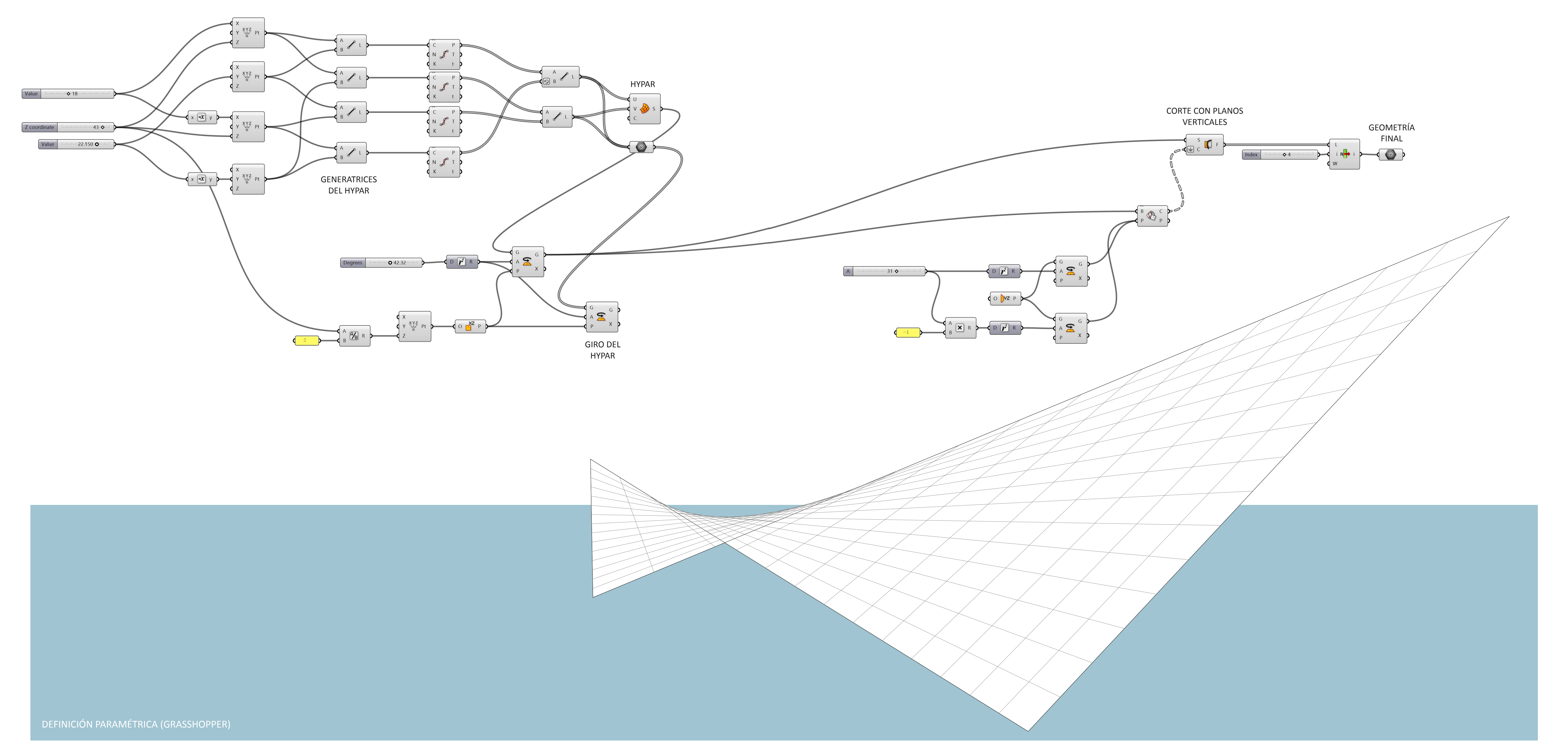
La forma de la cubierta de este edificio se origina a partir de un paraboloide hiperbólico de bordes rectos que se gira aproximadamente 45 grados y, posteriormente, se secciona por dos planos verticales que pasan por el centro de la geometría y coinciden con las dos generatrices que pasan por ese punto, por lo que se mantiene el borde recto en todo el perímetro de la cubierta.

La forma final que se obtiene es una cáscara de bordes rectos que consta de una planta romboidal, con una longitud de 36 metros en su eje mayor y 29 metros en su eje menor. Además cuenta con un espesor de 4 cm que se mantiene constante en toda su superficie.

Con lo que respecta a la iluminación, la cubierta se levanta en los vértices correspondientes al eje mayor de la geometría. En la parte que más se levanta se genera un gran hueco que se cubre de grandes vidrieras de colores que filtran la luz hasta el interior. En el lado opuesto es por donde se realiza el acceso a la capilla.

Página izquierda: Fig. 9. Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad sin vidrieras


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
ALZADOS
PLANTAS
x
y
z
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)
2. GIRO SOBRE EJE Y
3. CORTE CON PLANOS VERTICALES QUE PASAN POR EL CENTRO Y DOS GENERATRICES
4. GEOMETRÍA FINAL



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



RESTAURANTE LOS MANANTIALES (1957)

Este restaurante situado en Xochimilco, México, fue proyectado por Félix Candela junto con el arquitecto Joaquín Álvarez Ordóñez y es una de las estructuras laminares de hormigón armado más conocidas de Candela.

El proyecto consiste en un espacio de planta octogonal cubierto por una gran bóveda de arista de bordes libres que se forma a partir de la intersección de 4 paraboloides hiperbólicos. Los hypar se cortan por planos inclinados en sus extremos exteriores para generar los bordes curvos que caracterizan el contorno de la cubierta.

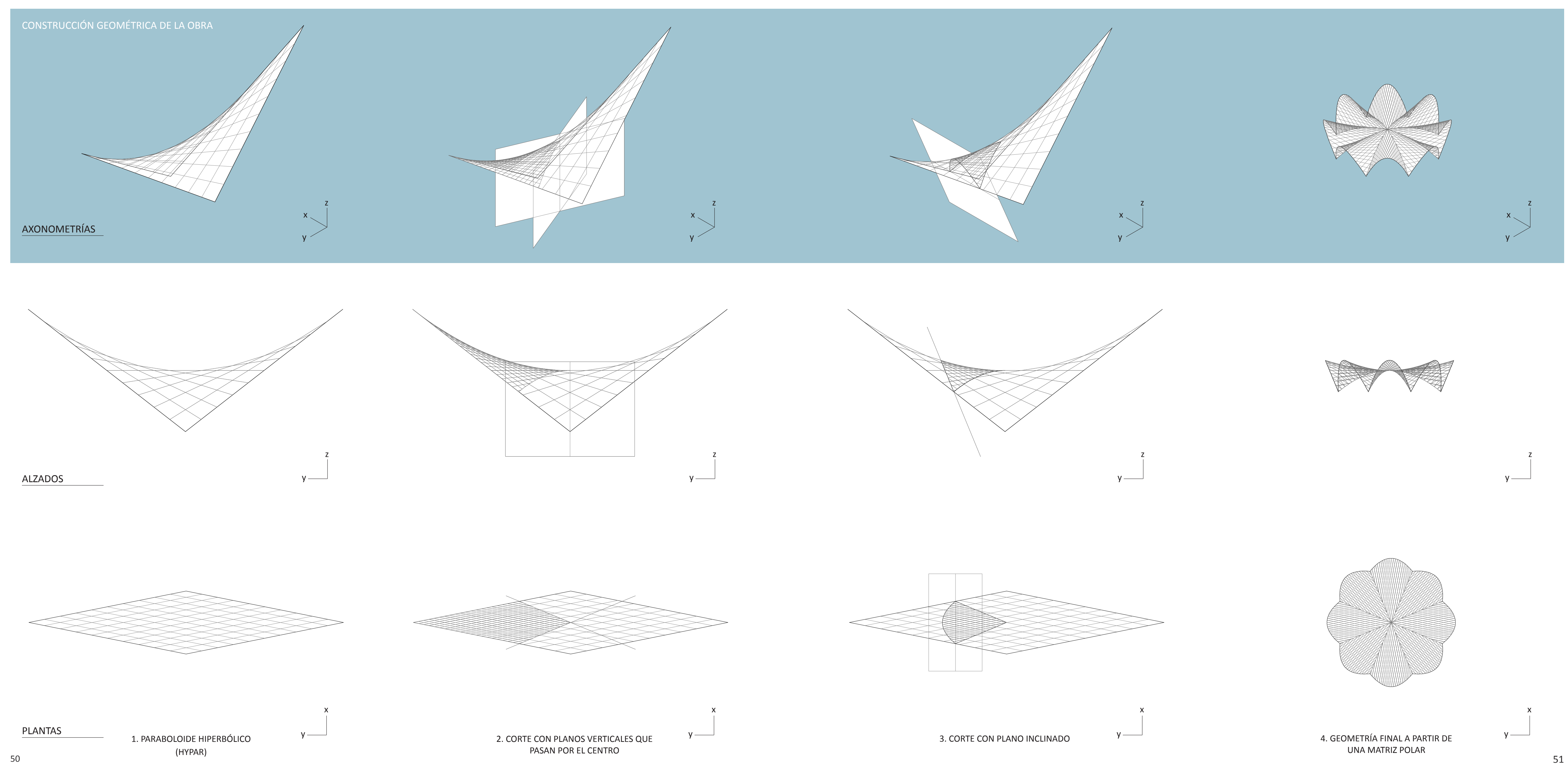
Gracias a las proporciones escogidas se obtiene una forma atractiva y resistente, que cuenta con tan solo 5 centímetros de espesor en las partes más delgadas y llega a los 12 centímetros en los bordes de intersección de los paraboloides hiperbólicos, los cuales tienen la función de dar rigidez al conjunto y conducir las cargas hasta los puntos de apoyo.

El volumen trata de integrarse en su entorno ajardinado junto al canal por medio de la curva, no habiendo en el diseño ninguna arista ni borde recto. Se simula la idea del volumen como una flor de loto que forma parte del conjunto natural.

La estructura tiene 8 puntos de apoyo que se encuentran zunchados por barras de acero en los cimientos, formando un octógono en el que se inscribe una circunferencia de 30 m de diámetro.

Además del restaurante situado en Xochimilco, existe una copia del mismo construida como obra póstuma de Candela en Valencia que se utiliza como restaurante del Oceanogràfic. Fue terminado en 2002 por el arquitecto valenciano Santiago Calatrava.

Página izquierda: Fig. 10. Vista desde el canal del restaurante Los Manantiales

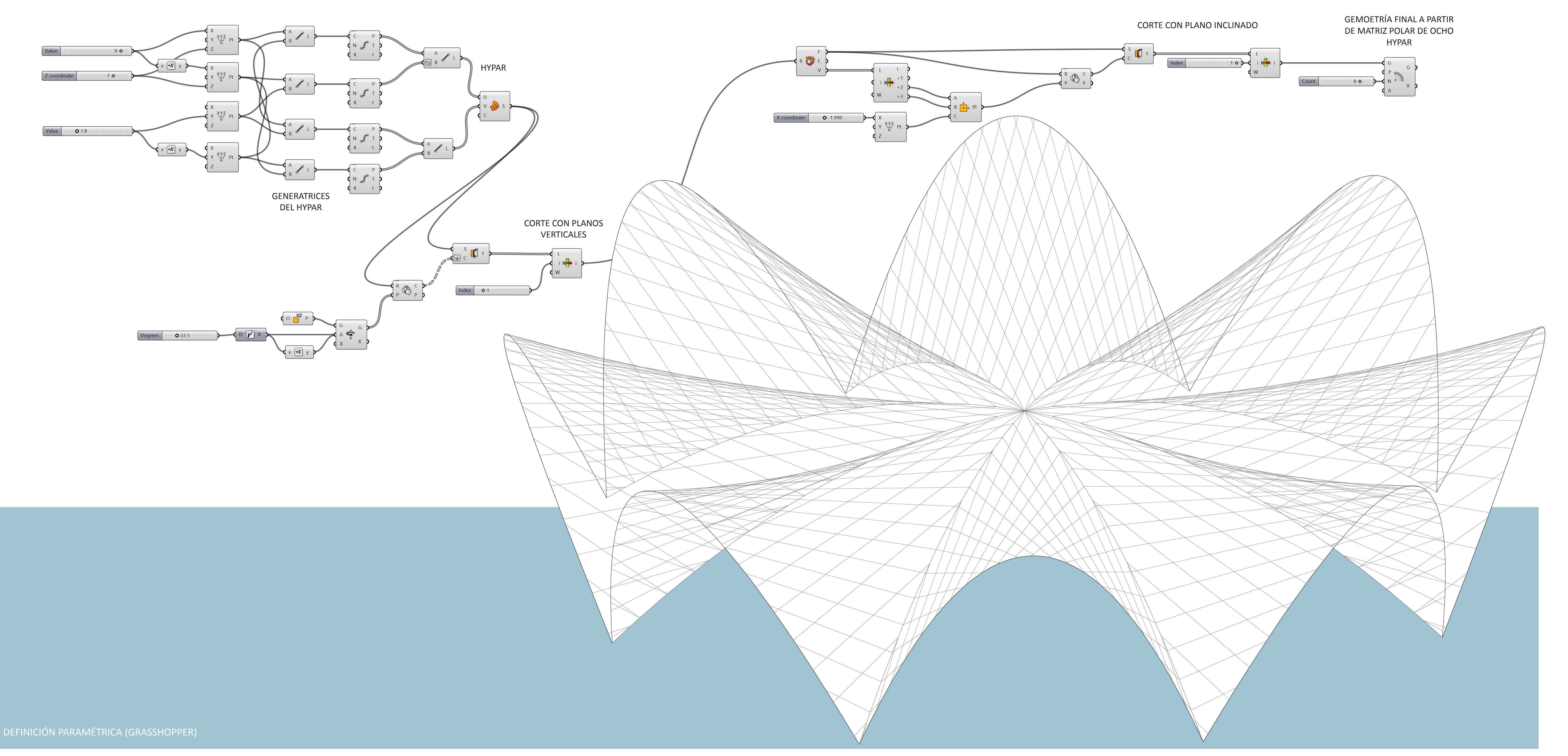


1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)

2. CORTE CON PLANOS VERTICALES QUE PASAN POR EL CENTRO

3. CORTE CON PLANO INCLINADO

4. GEOMETRÍA FINAL A PARTIR DE UNA MATRIZ POLAR



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



CAPILLA DE PALMIRA
(1959)

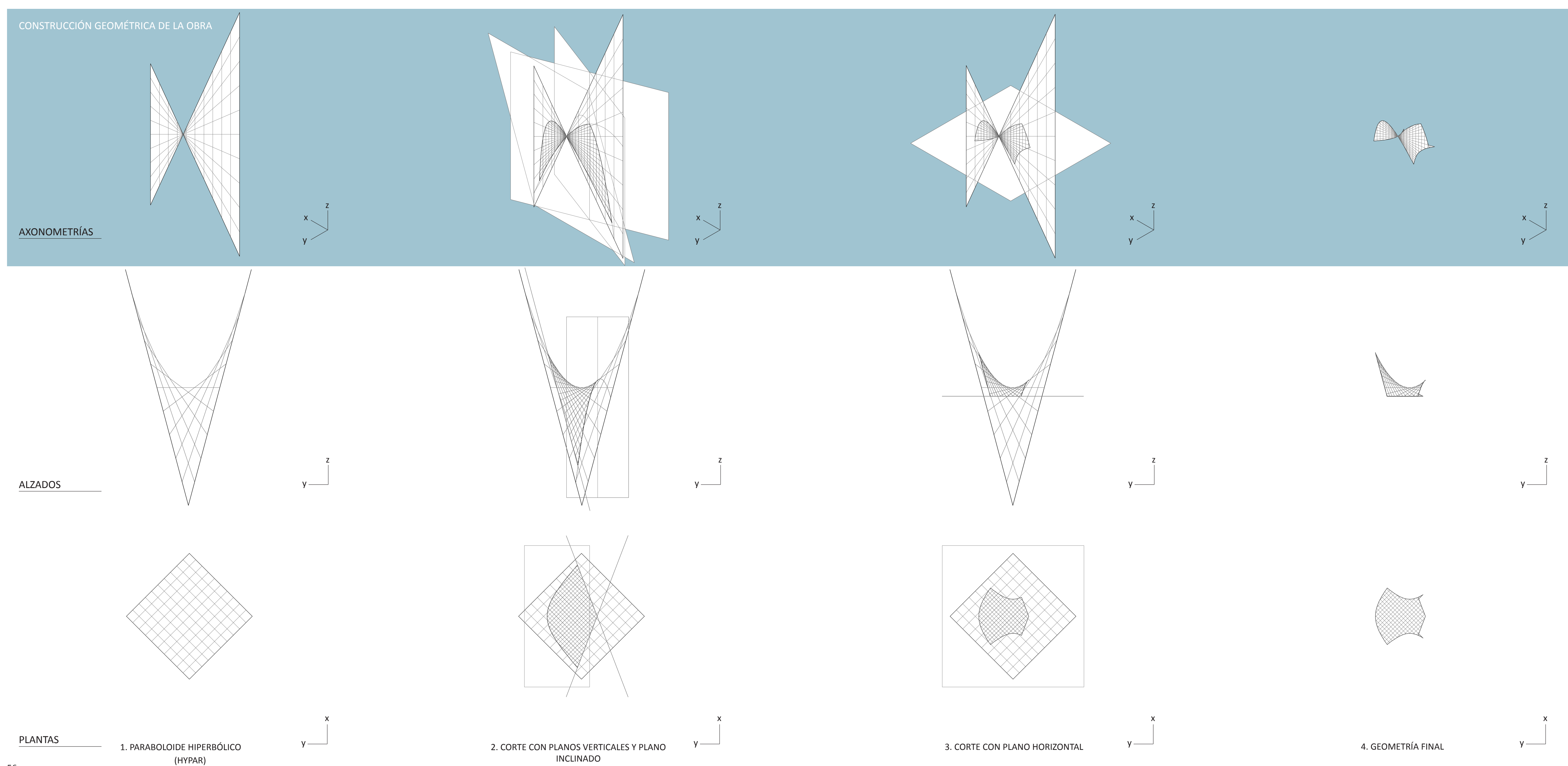
Esta capilla situada en Lomas de Cuernavaca, México, fue proyectada por el arquitecto Félix Candela con la colaboración de los arquitectos Guillermo Rosell y Manuel Larrosa. Tras un primer colapso de la estructura en el momento del descimbrado, Candela indicó como proceder con la reconstrucción del cascarón, construyendo la lámina que se mantiene hoy en día en pie y resulta ser una de sus obras más emblemáticas.

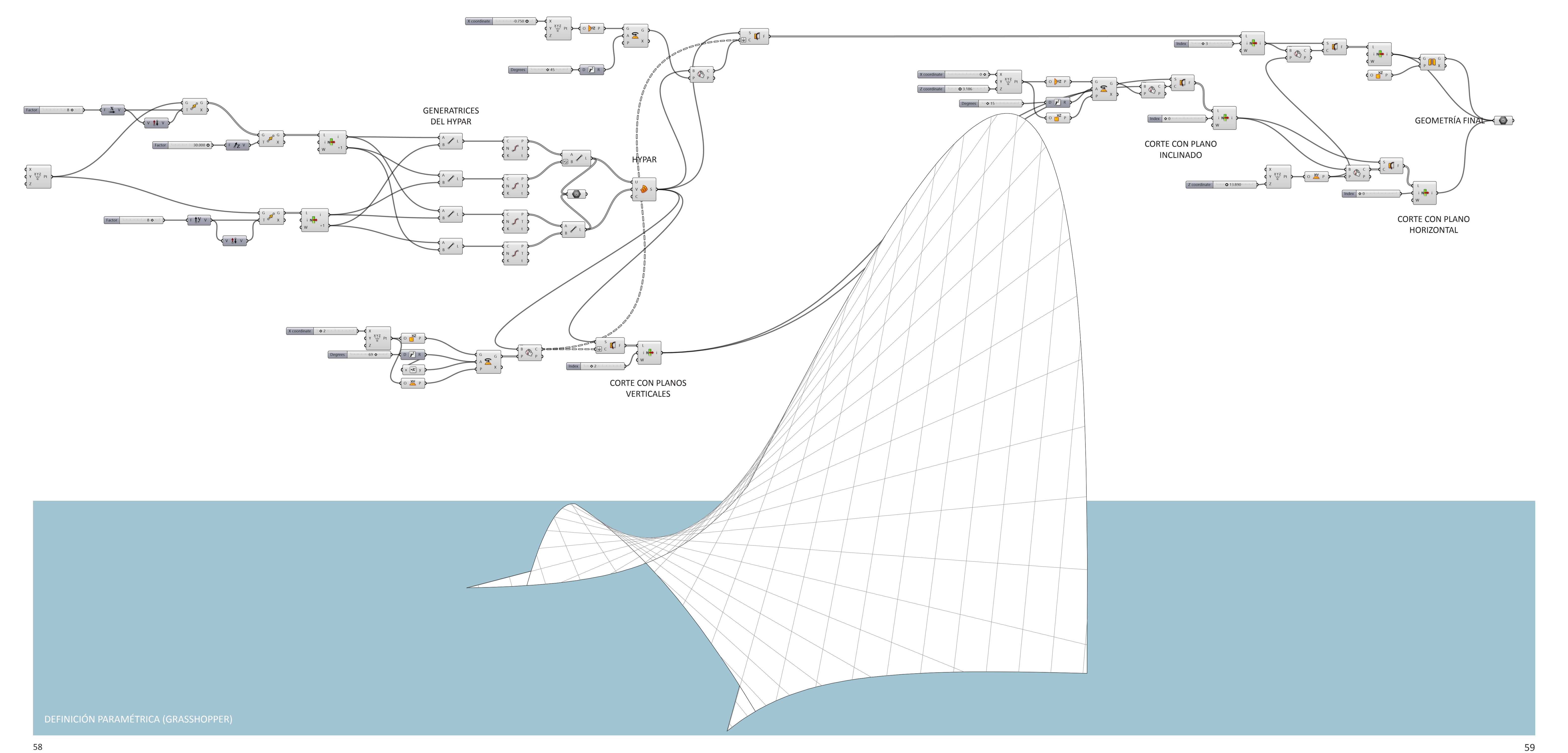
Se trata de una capilla abierta cuya cubierta está formada a partir de un único paraboloide hiperbólico que se secciona por varios planos y genera bordes curvos en todo su perímetro. En un extremo, cerca del centro de la geometría, el volumen se corta por medio de dos planos verticales, mientras que en el extremo opuesto se corta por medio de un plano inclinado, aumentando la parte volada de la geometría. La capilla se ve reducida a un espacio abierto a la sombra de una imponente estructura que se abre hacia el cielo.

Respecto a las dimensiones, en su punto más alto la estructura alcanza una altura de 22 metros, mientras que en la zona de menor cota, correspondiente al vértice del paraboloide, se reduce a una altura de 4’14 metros. Tal y como menciona Carmen Reig (2010, p.257) debajo del punto más bajo de la cubierta “el observador experimenta visualmente la potente fuerza de la cubierta abriéndose al exterior”. En la sección más delgada, la lámina alcanza un espesor mínimo de 4 centímetros.

La geometría obtenida es una estructura laminar de bordes curvos que ocupa un espacio en planta de 30 x 20 metros y destaca por su esbelta figura que interrumpe el horizonte introduciéndose en el cielo.

Página izquierda: Fig. 11. Capilla de Palmira


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
ALZADOS
PLANTAS
x
y
z
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)
2. CORTE CON PLANOS VERTICALES Y PLANO INCLINADO
3. CORTE CON PLANO HORIZONTAL
4. GEOMETRÍA FINAL



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



PLANTA EMBOTELLADORA
BACARDÍ
(1960)

Este proyecto fue construido en Cuautitlán, México, y fue proyectado por Félix Candela con la colaboración del ingeniero Luis Torres Landa. El proyecto consistía en una gran nave industrial para una línea de embotelladora y almacenaje, por lo que se requerían espacios grandes y diáfanos.

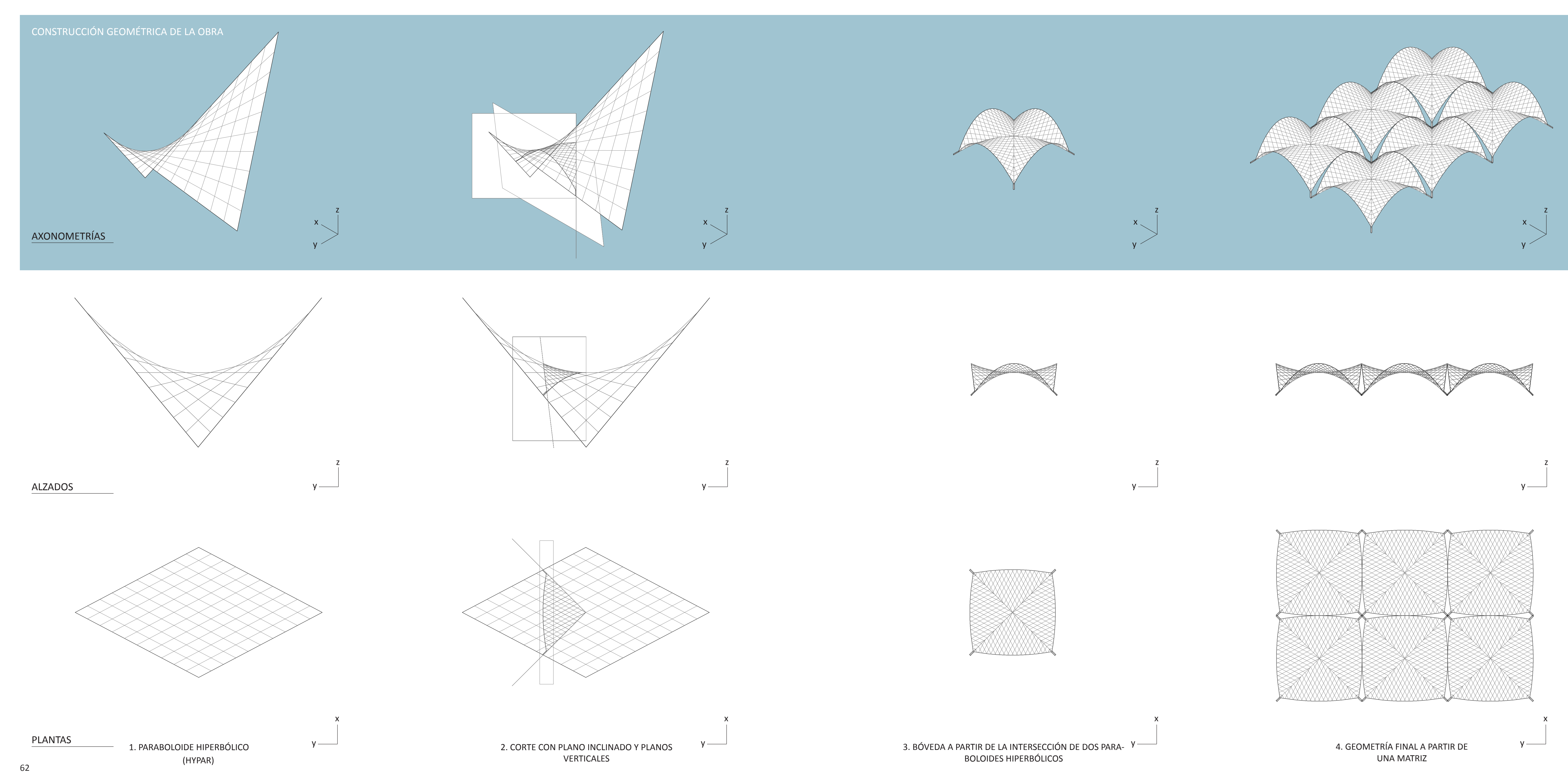
Candela proyecta una gran bóveda de arista formada por la intersección de dos paraboloides hiperbólicos con una dimensión en planta de 30 metros de lado. La geometría se ve seccionada en sus cuatro lados por un plano inclinado, produciendo bordes curvos en todo su perímetro. A partir de la repetición de la bóveda se genera una retícula en planta de 2 x 3 módulos para albergar un amplio espacio óptimo para el desarrollo de actividades industriales.

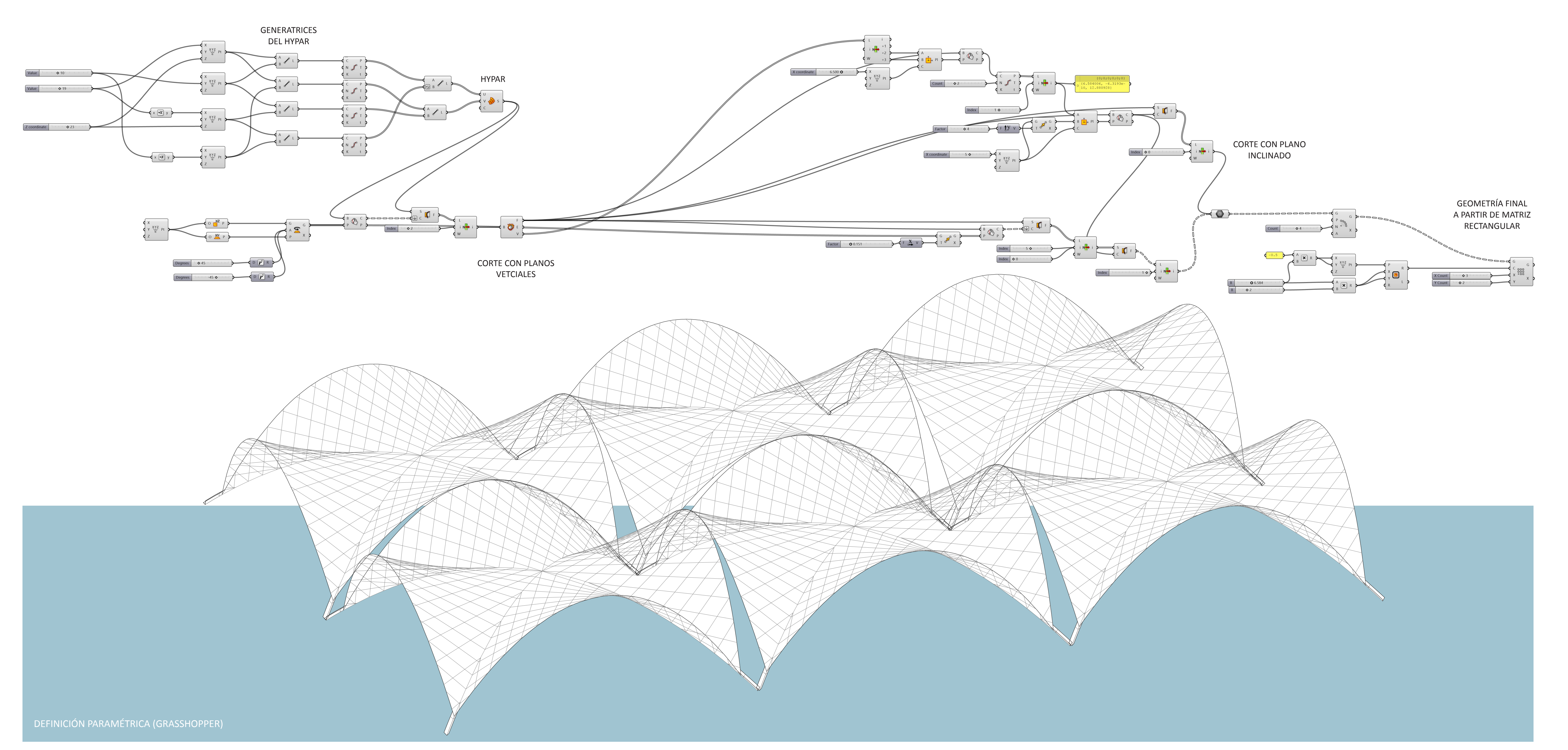
Las bóvedas constan de un espesor constante de 4 centímetros en toda su superficie y se apoya en el terreno mediante la prolongación de las esquinas inferiores, formando un cuadrado en planta.

Con lo que respecta a la iluminación, en los puntos de unión entre las seis bóvedas se produce una apertura que se aprovecha para permitir la entrada de luz natural en el interior del edificio.

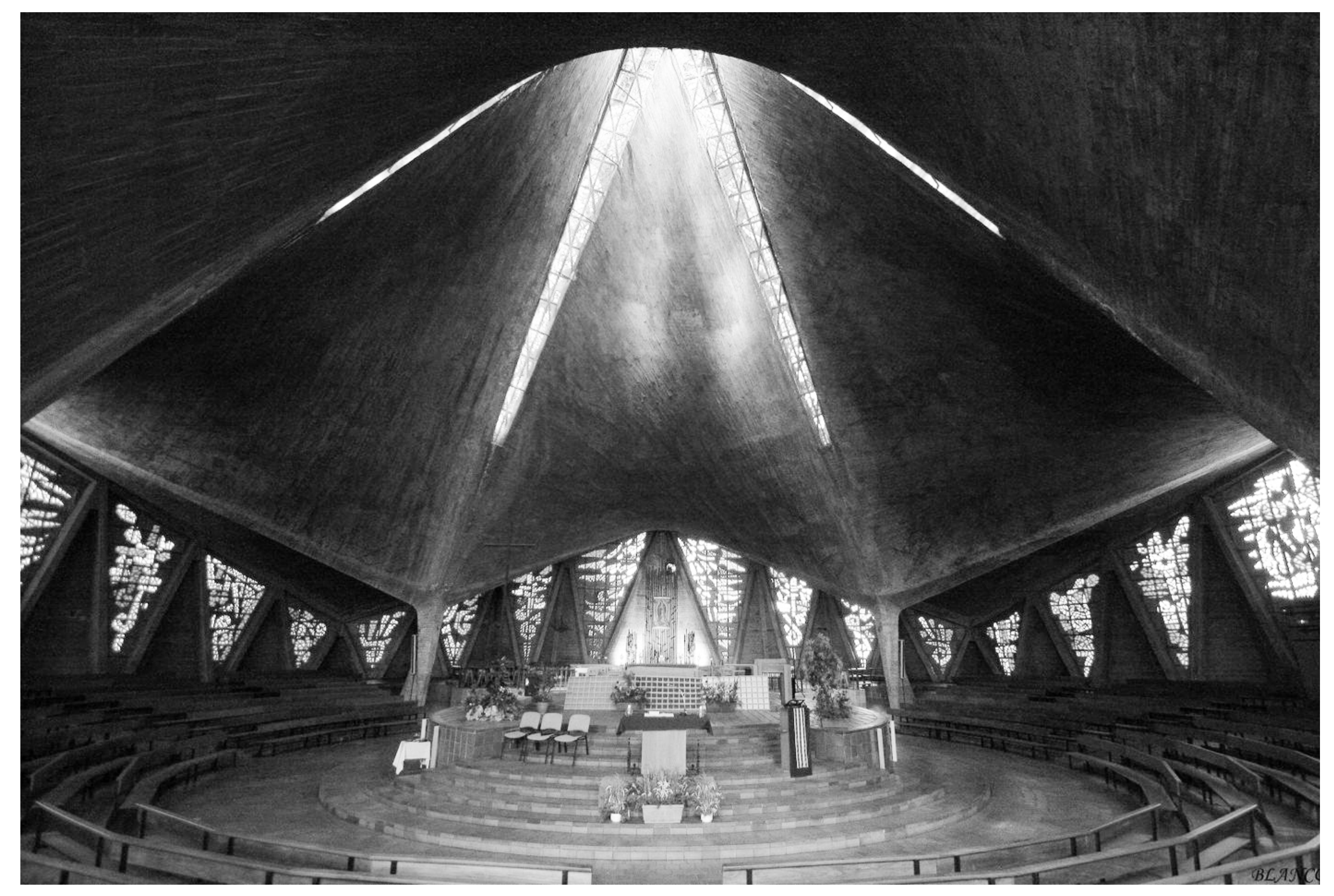
La bóveda que se emplea en este proyecto es una de las láminas más grandes proyectada por Candela, mostrando las capacidades de las estructuras laminares para cubrir grandes espacios.

Página izquierda: Fig. 12. Interior de la Planta Embotelladora Bacardí


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
ALZADOS
PLANTAS
x
y
z
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)
2. CORTE CON PLANO INCLINADO Y PLANOS VERTICALES
3. BÓVEDA A PARTIR DE LA INTERSECCIÓN DE DOS PARA- BOLOIDES HIPERBÓLICOS
4. GEOMETRÍA FINAL A PARTIR DE UNA MATRIZ



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)



IGLESIA DE NUESTRA SEÑORA DE GUADALUPE (1965)

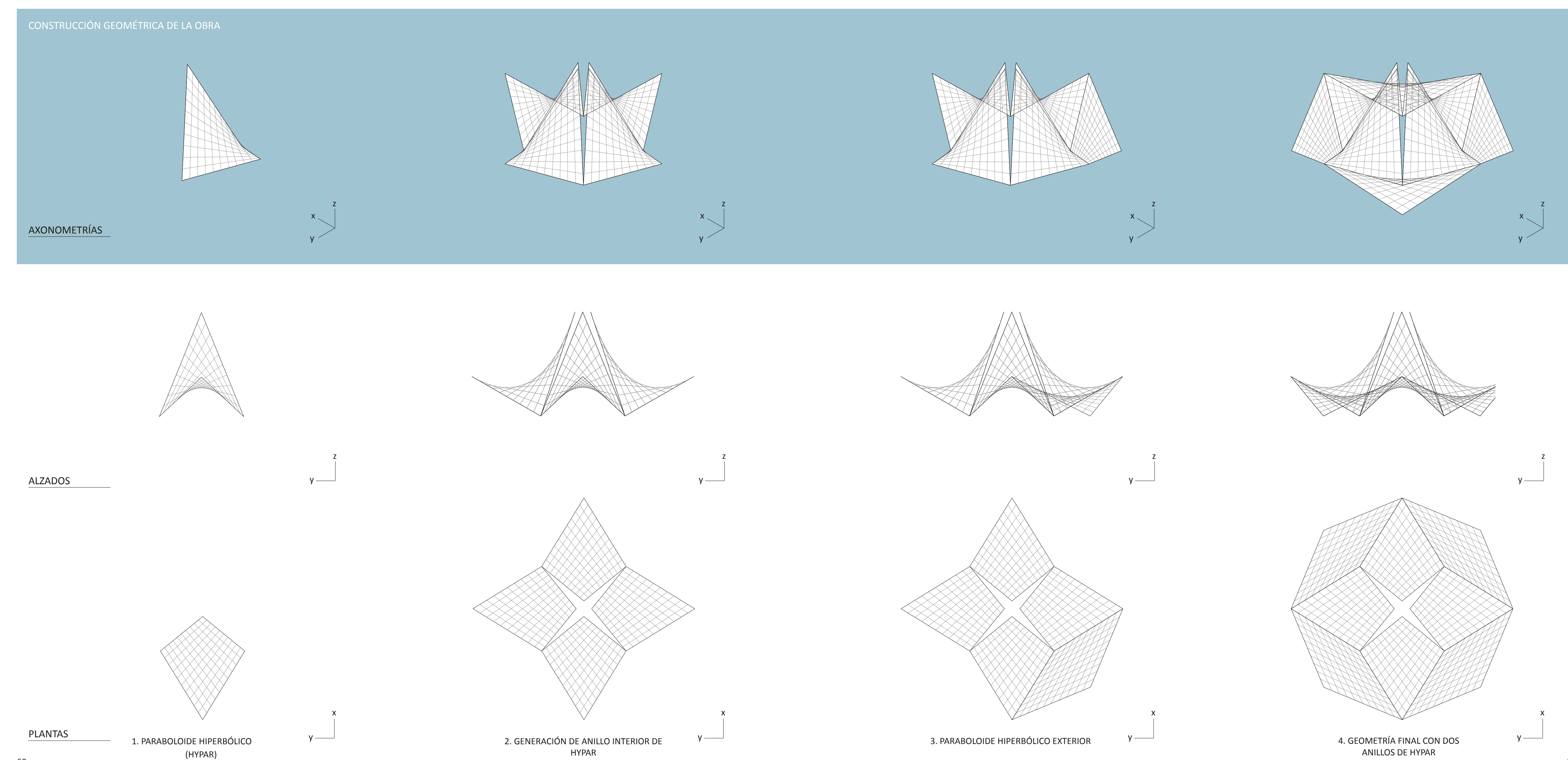
En este proyecto realizado en España, en la ciudad de Madrid, además de Félix Candela, intervienen los arquitectos Enrique de la Mora y José Ramón Azpiazu, y el ingeniero Jose Antonio Torroja Cabanilles. También es conocida como la Iglesia de los Mexicanos, por la similitud de la forma que se consigue con la de un sombrero mexicano. Además es una de las pocas obras de Candela que se pueden encontrar en España.

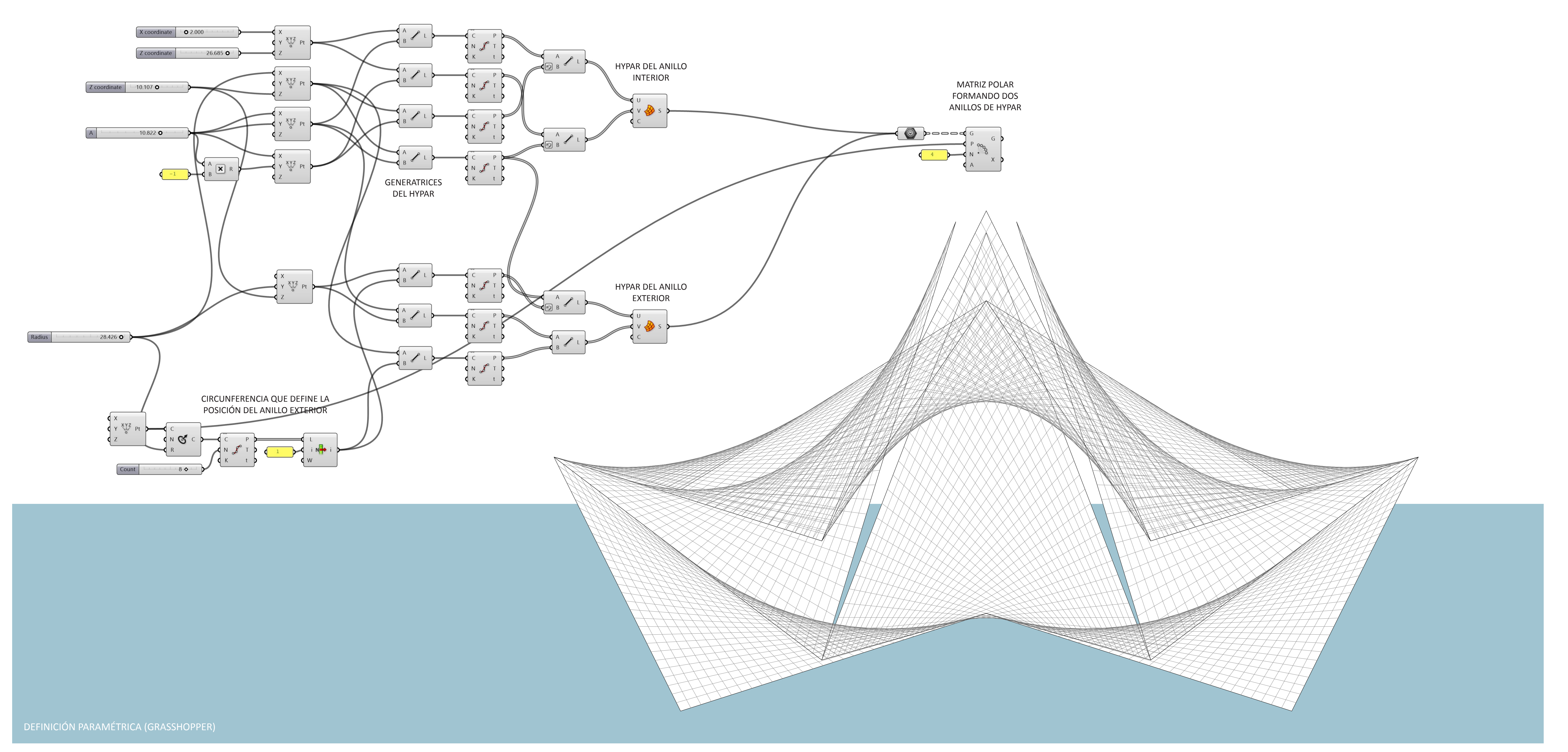
La cubierta de esta iglesia está formada por un total de ocho paraboloides hiperbólicos que se agrupan en dos anillos con cuatro hypars cada uno. Los cuatro del centro levantan su vértice central pero no llegan a unirse en la punta, dejando franjas verticales abiertas. Mientras que los del anillo exterior, de menor altura que los del interior, cierran el contorno de la geometría formando un octógono en planta con un diámetro del círculo circunscrito de 53’74 metros. Estos últimos se posicionan alrededor de los centrales, compartiendo, cada uno, dos de sus generatrices y dos vértices con los del interior.

Con lo que respecta a la iluminación, las franjas verticales que quedan abiertas en el centro de la geometría se cubren con vidrieras de colores que filtran la luz y bañan el interior del espacio. Por otro lado, el conjunto queda abierto por los laterales, donde los huecos también quedan cerrados por vidrieras de colores. El resultado es un interior iluminado tanto lateral, como cenitalmente, lo cual permite apreciar desde el interior la forma de las cáscaras de hormigón que componen la cubierta y que quedan bañadas de forma gradual por la luz.

Algo a destacar de esta obra es el diseño de los cuatro apoyos situados en los vértices centrales donde se encuentran las láminas del anillo interior con el exterior. La forma del pilar es como una prolongación del encuentro de los hypars. Como señala Javier Manterola (2010, p. 233) “El apoyo puntual que diseña es prodigioso en cuanto a la forma, disposición y continuidad con los paraboloides que sostiene”.

Página izquierda: Fig. 13. Interior de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe


CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA
AXONOMETRÍAS
ALZADOS
PLANTAS
x
y
z
1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)
2. GENERACIÓN DE ANILLO INTERIOR DE HYPAR
3. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO EXTERIOR
4. GEOMETRÍA FINAL CON DOS ANILLOS DE HYPAR



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)

ELADIO DIESTE





TERMINAL MUNICIPAL DE ÓMNIBUS (1973)

Está obra realizada por el ingeniero Eladio Dieste fue construida en Uruguay. El autobús es un medio de transporte muy utilizado en Uruguay y Dieste se encarga del diseño de esta terminal generando un espacio cubierto y protegido donde los autobuses puedan embarcar y desembarcar cómodamente.

En este proyecto realiza una estructura compuesta por siete bóvedas de directriz catenaria aputoportantes construidas en cerámica armada que descansan únicamente sobre una línea de pilares intermedios distanciados 6 metros entre ellos. Las bóvedas vuelcan a cada lado del pilar una distancia de 13'5 metros y, al contar con tan pocos puntos de apoyo, parecen flotar sobre el espacio.

Para reducir los empujes horizontales que se pueden llegar a producir en las bóvedas de los extremos, Dieste realiza una especie de viga horizontal de cerámica armada como una prolongación de la bóveda que absorbe las tensiones y evita las deformaciones horizontales. Esta a su vez se apoya en un pequeño tramo de viga que se proyecta desde el pilar.

En los extremos de las bóvedas no se percibe la sección original de la misma ya que no se produce el corte de la geometría por un plano vertical, sino que se realiza por un plano inclinado, transmitiendo la sensación al espectador de que las bóvedas tienen una mayor altura, ya que el arco se ve más pronunciado en dichos extremos.

Página izquierda: Fig. 14. Terminal Municipal de Ómnibus

CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA OBRA

AXONOMETRÍAS

x z y

ALZADOS

y z

PLANTAS

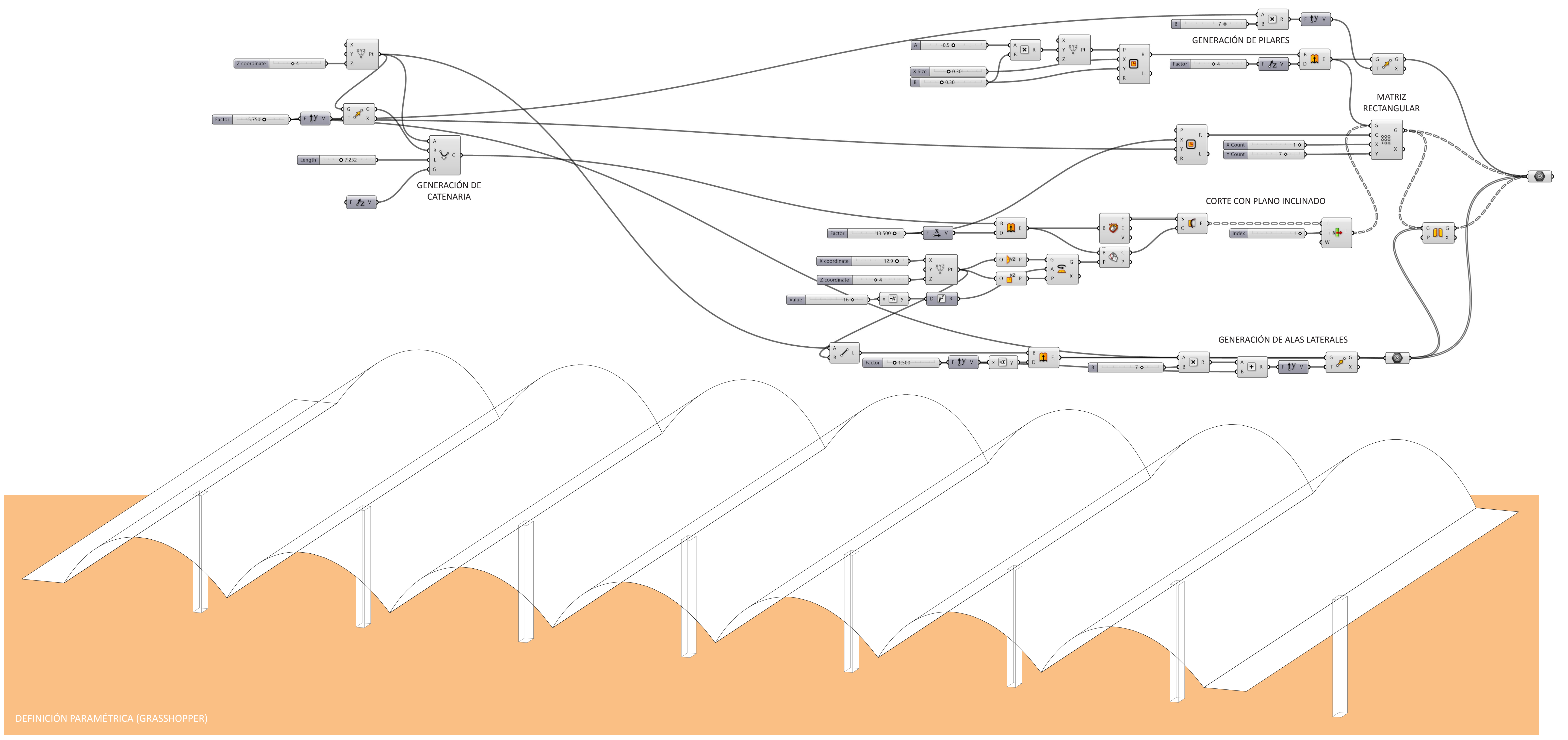
y x

1. BÓVEDA DE DIRECTRIZ CATENARIA

2. CORTE CON PLANO INCLINADO

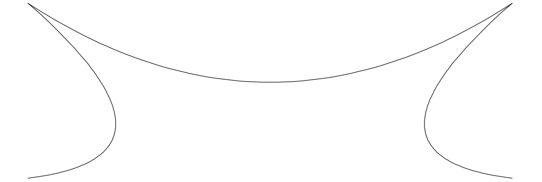
3. MATRIZ DE SIETE BÓVEDAS

4. GEOMETRÍA FINAL APOYADO SOBRE FILA DE SOPORTES CENTRALES



DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)

PROPUESTA





PARABEL

Llobregat Ruiz, Sergio
Solana Lacasa, Tomás

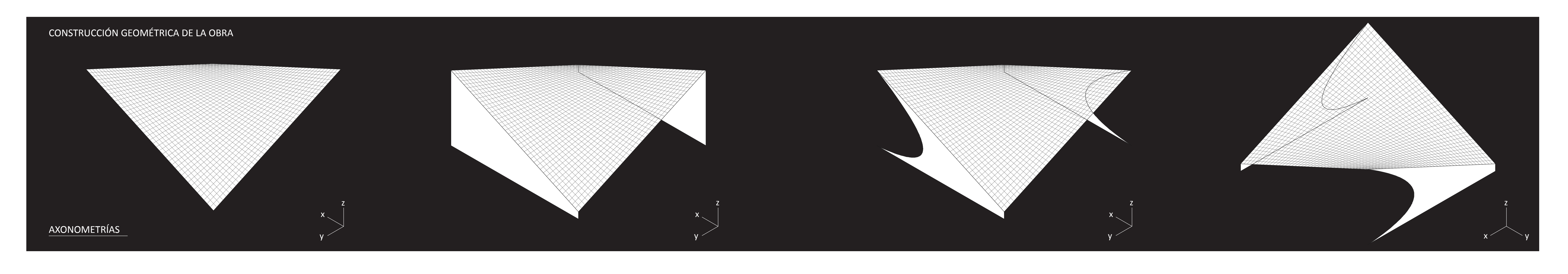
Se trata de un pabellón proyectado para la asignatura optativa de Técnicas Gráficas para la Generación de Formas Complejas, en la que se produce el aprendizaje de los programas de modelado de Rhinoceros y Grasshopper empleados en el desarrollo de presente trabajo. En la asignatura se proponía la aplicación de los conocimientos obtenidos para la realización de un pabellón que se ubicaría en la plaza del Ágora, dentro de la Universitat Politècnica de València y la realización de un modelo físico a escala 1/50.

Como propuesta se plantea una estructura laminar basada en las cáscaras de hormigón proyectadas por Félix Candela que recupera la geometría del paraboloide hiperbólico utilizada a lo largo de toda su obra. Se escoge un hypar de planta cuadrada de 20 metros de lado que cubre un amplio espacio y queda apoyado sobre dos planos verticales que se recortan generando una curva en el alzado para mantener la continuidad de la curvatura de la cubierta. Además, generar esta forma en los apoyos potencia la sensación de ligereza del conjunto y aumenta el ángulo desde el que se puede observar la parte interior de la cubierta permitiendo entender mejor la geometría.

Para la realización del modelo físico y las imágenes renderizadas se propone una "lámina en rejilla" o "lámina de entramado" formada por nervios de madera que se inscriben en la superficie de la cubierta cuyo comportamiento es similar al de una lámina o membrana continua.

Las costillas que componen el entramado son paralelas a las generatrices que forman el paraboloide hiperbólico, por lo que son costillas rectas que conforman una superficie curva, dejando ver a simple vista que se trata de una superficie reglada. El pabellón consta de 40 costillas en cada dirección que apoyan sobre dos planos laterales.

Página izquierda: Fig. 15. Vista interior del Pabellón



ALZADOS

PLANTAS

1. PARABOLOIDE HIPERBÓLICO (HYPAR)

2. FORMACIÓN DE APOYOS LATERALES

3. GEOMETRÍA FINAL

4. VISTA ALTERNATIVA DE GEOMETRÍA FINAL

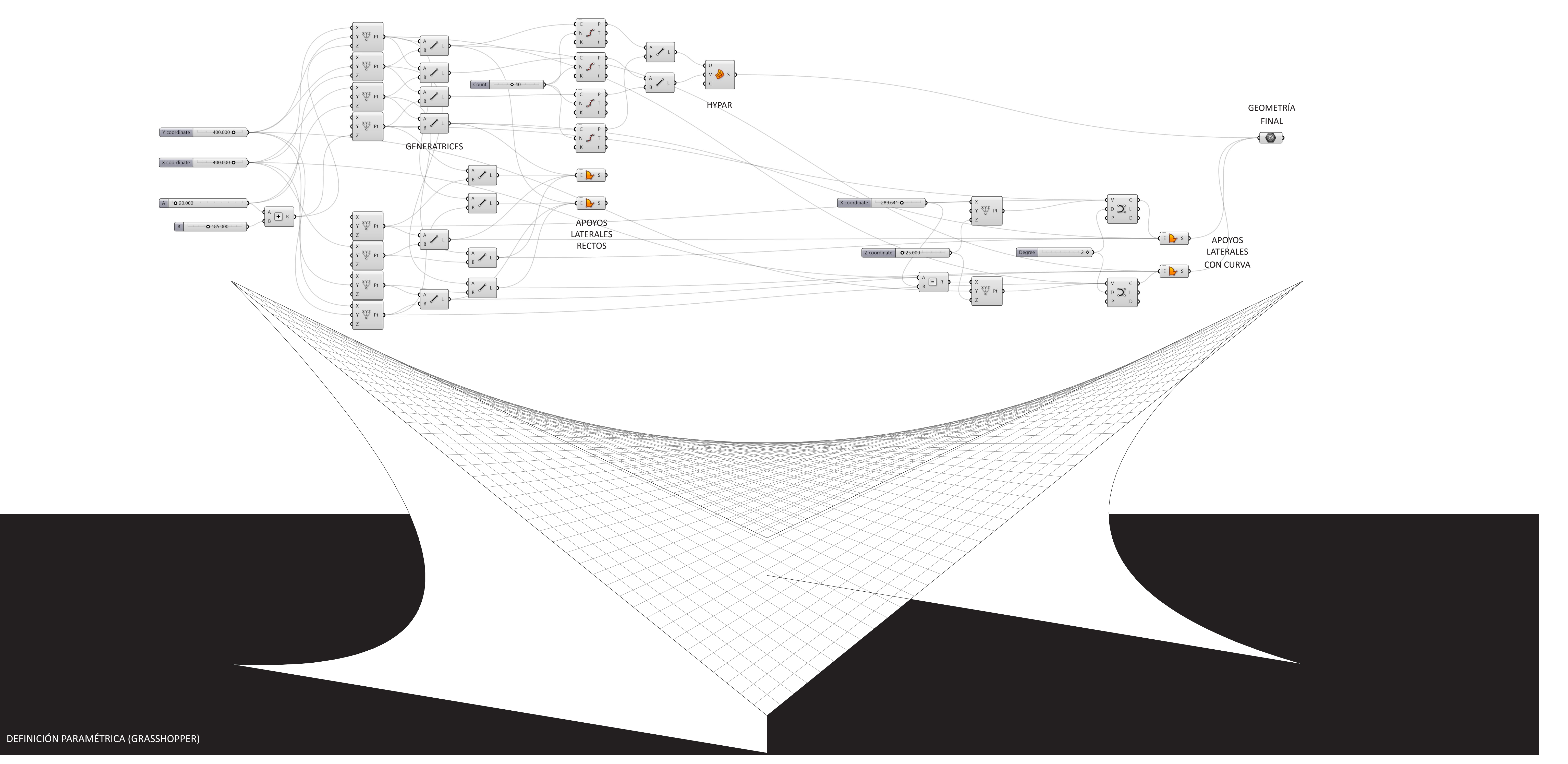

GENERATRICES
HYPAR
GEOMETRÍA
FINAL
APOYOS
LATERALES
RECTOS
APOYOS
LATERALES
CON CURVA
Y coordinate 400.000
X coordinate 400.000
A 20.000
B 185.000
Count 40
X coordinate 289.641
Z coordinate 25.000
Degree 2
DEFINICIÓN PARAMÉTRICA (GRASSHOPPER)

Fig. 16.
Vista exterior del pabellón



Fig. 17.
Fotografía de maqueta

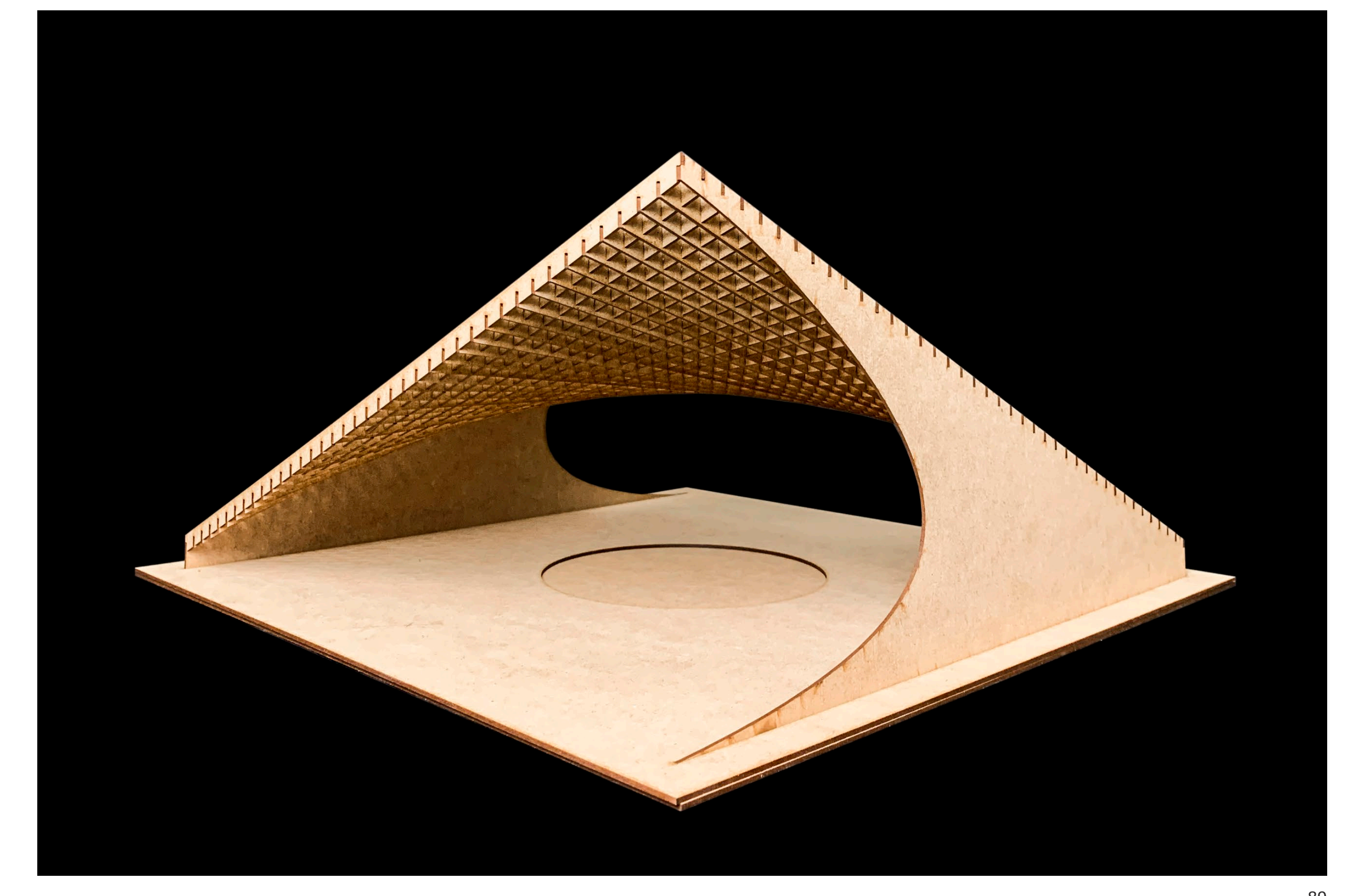
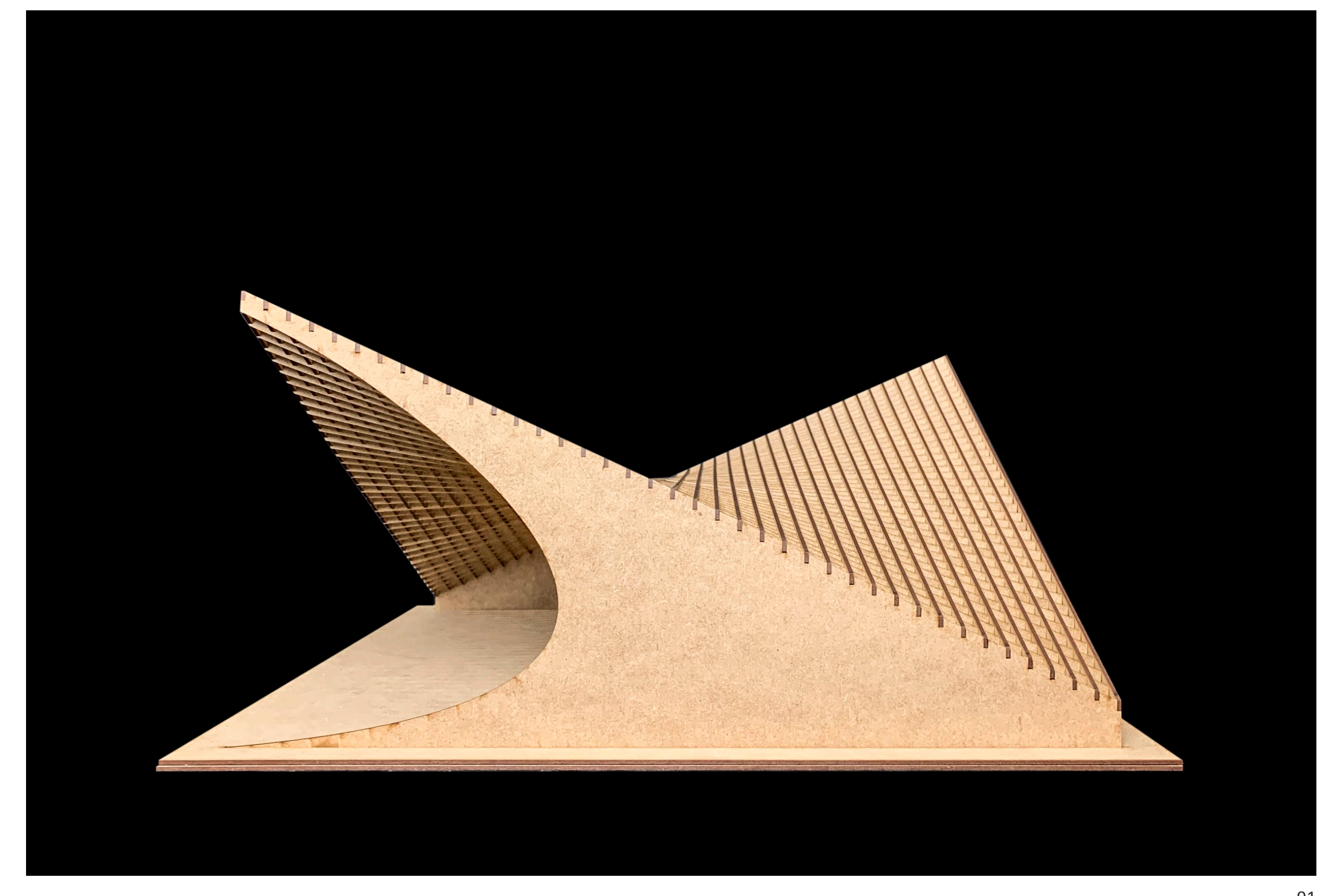


Fig. 18.
Vista exterior del pabellón



Fig. 19.
Fotografía de maqueta



CONCLUSIONES

Desde los orígenes de la arquitectura siempre se ha buscado la forma más eficiente que, acompañada del material adecuado, permita el óptimo comportamiento estructural de las construcciones. Sin embargo, es con las estructuras laminares y las innovaciones técnicas que las acompañan, cuando se alcanza la máxima esbeltez de las formas.

Como se ha podido comprobar en este estudio, la geometría juega un papel fundamental en la búsqueda de la forma resistente. Los autores de las estructuras laminares seleccionadas no basan su arquitectura en una forma caprichosa, en todas las obras expuestas en el presente trabajo se parte siempre de una forma geométrica que es escogida por sus cualidades estructurales y las posibilidades constructivas que ofrece. Estos autores consiguen unificar forma, estructura y función en construcciones de gran interés arquitectónico.

Con el uso de las herramientas Rhinoceros y Grasshopper ha sido posible la generación y representación de estas formas paramétricas. Gracias a las posibilidades que ofrecen dichas herramientas se ha podido estudiar y entender la esencia de las estructuras laminares, permitiendo interpretar y representar el proceso de su construcción geométrica.

BIBLIOGRAFÍA / RECURSOS EN RED

Anda Alanís, Enrique X. de (2008) *Félix Candela: 1910-1997: el dominio de los límites*. Hohenzollernring: Köln: Taschen, cop. 2008.

Antuña Bernardo, J. (2003) ”Gran Mercado de Algeciras”. En: Sambricio y Rivera-Echegaray, C., Sánchez Arcas, M., Fundación Cultural COAM y Fundación Caja de Arquitectos. *Manuel Sánchez Arcas, arquitecto*. Madrid: Fundación Caja de Arquitectos.

Casinello, P. (2010) “Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna: Thin Concrete Shells”. En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

García Reig, C. (2010) “La geometría inteligente”. En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

Goicolea Ruigómez, J. M. (2010) “El formalismo de Félix Candela”. En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

González Valle, E. (2010) “La forma estructural en la obra de Félix Candela”. En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

Larrambebere, G. (2010) “Félix Candela y Eladio Dieste, dos maestros” En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

Manterola, J. (2010) “Apoyar” En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

Pedreschi, R. (2000) *Eladio Dieste*. London: Thomas Telford, 2000.

Seguí Buenaventura, M. (1994) *Félix Candela arquitecto*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Torroja Miret, E. (2010) *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Ediciones Doce Calles, S.L.

Torroja, J. A. (2010) “Félix Candela y el Paraboloide Hiperbólico: forma estructural y forma visual”. En: Cassinello, P. *Félix Candela: centenario 2010: la conquista de la esbeltez*. Madrid: Fundación Juanelo Turriano, Universidad Politécnica de Madrid.

Recursos en red:

Basset Salom, L. *Estructuras laminares*. Disponible en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30402/Estructuras%20laminares.pdf [Consultado 16-2-2019]

Escárcega Olivares, M., Alarcón Azuela, E. y Álvarez Tostado Pérez Casas, G. S. [Moisés Escárcega]. (2013). *Cascarones de concreto armado: Bordes Curvos* [Archivo de video]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=3TKRYgzs_R0&list=LL-HuKspG2VnvxEx53tk-XpA&index=7&t=134s

Escárcega Olivares, M., Alarcón Azuela, E. y Álvarez Tostado Pérez Casas, G. S. [Moisés Escárcega]. (2013). C*ascarones de concreto armado: Bordes Rectos* [Archivo de video]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=xPqL-g-z0sY&list=LL-HuKspG2VnvxEx53tk-XpA&index=32&t=283s

González Pendrás, M. (2017) “Errores concretos, o la magia de los cascarones”, *Revistas UNAM,* 37, pp. 32-43. Disponible en: http://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/view/64829/56979 [Consultado 28-9-2019]

J. Mas Guindal, A. y Mª Adell, J. (2005) “Eladio Dieste y la cerámica estructural en Uruguay”, I*nformes de la Construcción*, 56 (496). Disponible en: http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/459/532 [Consultado 6-10-2019]

Medios Audiovisuales (2007) *Eladio Dieste*. Disponible en: http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/ [Consultado 6-9-2019]

Molina, E. [erik molina]. (2017). *Cascarones de Felix Candela, diseño paramétrico en grasshopper.* [Archivo de video]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=7DIy6K1hXoo&list=LL-HuKspG2VnvxEx53tk-XpA&index=30&t=233s

REFERENCIA DE IMÁGENES

Fig. 1 - *Representación del paraboloides hiperbólico* [Dibujo]. Disponible en: Seguí Buenaventura, M. (1994) *Félix Candela arquitecto*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Fig. 2 - *Modelo a escala 1:10 del Frontón de Recoletos* [fotografía]. Disponible en: http://www.fundacioneduardotorroja.org/documentos/MUSEO/CATALOGO%20ESPAÑOL.pdf [Consultado 5-10-2019]

Fig. 3 - *Preparación de cimbras de la Capilla de Palmira* [fotografía]. Disponible en: Seguí Buenaventura, M. (1994) *Félix Candela arquitecto*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Fig. 4 - *Construcción de la cubierta ondulada de la Iglesia de la Atlántida con las piezas en retícula y el armado homogéneo, dejando un espacio para incorporar el armado del tirante* [fotografía]. Disponible en: http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/459/532 [Consultado 6-10-2019]

Fig. 5 - *Interior del Mercado de Algeciras* [fotografía]. Disponible en: Sambricio y Rivera-Echegaray, C., Sánchez Arcas, M., Fundación Cultural COAM y Fundación Caja de Arquitectos (2003) *Manuel Sánchez Arcas, arquitecto*. Madrid: Fundación Caja de Arquitectos.

Fig. 6 - *Interior del Frontón de Recoletos*. Disponible en: http://artchist.blogspot.com/2017/05/antiguo-fronton-recoletos-en-madrid.html [Consultado el 3-9-2019]

Fig. 7 - *Pabellón de los Rayos Cósmicos*. Disponible en: https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-de-rayos-cosmicos/ [Consultado el 19-9-2019]

Fig. 8 - Recamier, C. (1953) *Paraguas experimental* [fotografía]. Disponible en: Anda Alanís, Enrique X. de (2008) *Félix Candela: 1910-1997: el dominio de los límites*. Hohenzollernring: Köln: Taschen, cop. 2008.

Fig. 9 - *Iglesia de Nuestra Señora de la Soledad sin vidrieras*. Disponible en: https://unavidamoderna.tumblr.com/post/38719984684/capilla-de-los-misioneros-del-esp%C3%ADritu-santo [Consultado el 12-9-2019]

Fig. 10 - *Vista desde el canal del restaurante Los Manantiales*. Disponible en: https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela [Consultado el 13-9-2019]

Fig. 11 - *Capilla de Palmira*. Disponible en: https://www.coleccioncisneros.org/editorial/cite-site-sights/cuernavaca [Consultado el 21-9-2019]

Fig. 12: *Interior de la Planta Embotelladora Bacardí*. Disponible en: Seguí Buenaventura, M. (1994) *Félix Candela arquitecto*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Fig. 13: *Interior de la Iglesia de Nuestra Señora de Guadalupe*. Disponible en: https://i.pinimg.com/originals/cb/82/85/cb82853d1818a5f60934f564c9789011.jpg [Consultado el 26-9-2019]

Fig. 14: *Terminal Municipal de Ómnibus*. Disponible en: http://www.fadu.edu.uy/eladio-dieste/obras/terminal-municipal-de-omnibus/ [Consultado el 23-9-2019]

Fig. 15: Llobregat Ruiz, S. y Solana Lacasa, T. (2019) *Vista interior del Pabellón* [Render]

Fig. 16: Llobregat Ruiz, S. y Solana Lacasa, T. (2019) *Vista exterior del Pabellón* [Render]

Fig. 17: Llobregat Ruiz, S. y Solana Lacasa, T. (2019) *Fotografía de maqueta* [Fotografía]

Fig. 18: Llobregat Ruiz, S. y Solana Lacasa, T. (2019) *Vista exterior del Pabellón* [Render]

Fig. 19: Llobregat Ruiz, S. y Solana Lacasa, T. (2019) *Fotografía de maqueta* [Fotografía]

Valencia, octubre 2019